STAR-CCM+与流场计算

主　编　李　明　李明高
副主编　高　峰　孔繁冰



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

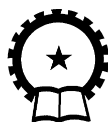


VISIT…

LANZAROTE
Caliente.COM

STAR-CCM+与流场计算

主　编　李　明　李明高
副主编　高　峰　孔繁冰



机 械 工 业 出 版 社

本书详细介绍了STAR-CCM+软件应用于流场分析的各种功能、基本操作方法和行业应用实例。

本书共6章，第1章主要介绍流体力学基础知识，第2章主要介绍STAR-CCM+软件的安装、界面和基本操作，第3章主要介绍采用非定常计算方法进行散热器的流固耦合流场、温度场模拟分析，第4章主要介绍小汽车网格划分、采用分离式计算方法进行外流场计算和阻力分析，第5章主要介绍采用耦合式计算方法进行高速列车空气动力学性能计算、横风性能计算与分析，第6章主要介绍Fieldview软件的界面、基本功能和使用案例。

本书可供教学、科研和设计部门从事传热、流体流动等学科的教师、工程技术人员与科研人员参考，或用于软件自学用教程或参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

STAR-CCM+与流场计算/李明，李明高主编. —北京：机械工业出版社，2011.11

ISBN 978-7-111-35792-6

Ⅰ.①S… Ⅱ.①李…②李… Ⅲ.①流场-计算-应用软件，STAR-CCM+ Ⅳ.①O35-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第181941号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑：连景岩 责任编辑：连景岩 版式设计：张世琴

责任校对：纪 敬 封面设计：路恩中 责任印制：李 妍

高等教育出版社印刷厂印刷

2011年10月第1版第1次印刷

184mm×260mm ·17.5印张·427千字

0001—3000册

标准书号：ISBN 978-7-111-35792-6

定价：49.80元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

社服务中心：(010)88361066

销售一部：(010)68326294

销售二部：(010)88379649

读者购书热线：(010)88379203

网络服务

门户网：http://www.cmpbook.com

教材网：http://www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

前　　言

STAR-CCM+是一款优秀的CFD模拟软件。它将现代软件工程技术、最先进的连续介质力学数值技术(Computational Continuum Mechanics Algorithms)和卓越的设计结合在一起。STAR-CCM+软件的目标是发展成为可以解析任何连续介质力学场的全新代码。

STAR-CCM+软件的一体化集成环境、高重复性和适用性是其被誉为新一代CFD软件的最强闪光点。在STAR-CCM+一体化的工作环境中，可以通过一体化用户界面展示从CAD建模、表面网格准备、体网格生成、模型设定、计算求解一直到后处理分析的整个模拟过程。操作界面与模拟思想的良好整合使得STAR-CCM+非常方便和高效，很好地实现了用户、计算机系统和模拟三者之间的交互操作。

为了将物理情况准确地体现在模拟中，得到良好的计算结果，STAR-CCM+致力于以下三个关键因素：稳健并准确的数值算法；覆盖面宽广的物理模型；易处理的网格体系。

本书全面介绍了STAR-CCM+5.02软件应用于流场分析的各种功能、基本操作方法和行业应用实例。全书共6章，第1章主要介绍流体力学基础知识，第2章主要介绍STAR-CCM+5.02软件的安装、界面和基本操作，第3章主要介绍采用非定常计算方法进行散热器的流固耦合流场、温度场模拟分析，第4章主要介绍小汽车网格划分、采用分离式计算方法进行外流场计算和阻力分析，第5章主要介绍采用耦合式计算方法进行高速列车空气动力学性能计算、横风性能计算与分析，第6章主要介绍Fieldview软件的界面、基本功能和使用案例。

本书由李明、李明高任主编，高峰和孔繁冰任副主编。参与编写的还有杨耀华、邵蓉、万翠英、李娜、雷岩鹏、姚峰、彭涤曲、李海强、马雷、唐晨、陈倩倩、邵其方、解雪林等。同时感谢同事韩璐、李国清在本书编写过程中给予的宝贵建议。由于编者水平有限，书中难免有不妥、疏漏之处，欢迎广大读者对本书提出批评和建议，以便做进一步修改和补充。

编　者

目　　录

前言
第 1 章　计算流体力学基础 ……… 1
1.1　流体力学的基本概念 ……… 1
1.2　计算流体力学的基本概念 ……… 3
1.3　流体运动及换热的基本控制方程 ……… 7
1.4　湍流模型 ……… 8
1.5　近壁面模型 ……… 9
1.6　CFD 求解计算的方法 ……… 11
1.7　网格简介 ……… 13
1.7.1　结构化网格 ……… 13
1.7.2　非结构化网格 ……… 14
1.7.3　混合网格 ……… 16
第 2 章　STAR-CCM + 软件介绍 ……… 17
2.1　软件概述 ……… 17
2.1.1　网格形式 ……… 18
2.1.2　STAR-CCM + 常用的四个术语 ……… 22
2.2　软件安装流程 ……… 23
2.2.1　安装指南 ……… 23
2.2.2　启动 License ……… 31
2.3　软件界面介绍 ……… 35
2.3.1　菜单 ……… 35
2.3.2　工具栏 ……… 38
2.3.3　树形菜单 ……… 40
2.3.4　视图区 ……… 40
2.3.5　属性栏 ……… 41
2.3.6　输出窗口 ……… 42
2.3.7　鼠标操作 ……… 42
2.4　前处理工具介绍 ……… 43
2.4.1　包面功能概述 ……… 43
2.4.2　重构功能概述 ……… 45
2.4.3　面网格检查和修补功能 ……… 45
2.4.4　一些网格修复技巧 ……… 51
2.5　体网格工具介绍 ……… 57
2.5.1　体网格工具 ……… 57
2.5.2　边界层设置 ……… 57
2.5.3　体网格加密 ……… 59
2.5.4　体网格质量标准 ……… 59
2.6　求解器 ……… 61
2.7　后处理 ……… 62
2.8　辅助工具 Tools ……… 67
2.8.1　Annotations ……… 67
2.8.2　Coordinate Systems ……… 67
2.8.3　Field Functions ……… 70
2.8.4　Materials ……… 70
2.8.5　Motions ……… 71
2.8.6　Volume Shapes ……… 71
第 3 章　散热器的流固耦合换热模拟 ……… 73
3.1　建立计算模型 ……… 74
3.1.1　新建计算模型 ……… 74
3.1.2　选择网格模型 ……… 75
3.1.3　网格参数设定 ……… 78
3.2　流固物理模型设定 ……… 79
3.2.1　流体物理模型设定 ……… 79
3.2.2　固体物理模型设定 ……… 81
3.2.3　Region 的分割 ……… 84
3.2.4　边界条件设定 ……… 87
3.2.5　Region 模型设定 ……… 90
3.2.6　保存模型 ……… 90
3.3　流固耦合换热计算 ……… 90
3.3.1　设置计算条件 ……… 90
3.3.2　非定常计算设置 ……… 96
3.3.3　体网格的生成 ……… 101
3.3.4　执行计算 ……… 101
3.4　计算结果后处理 ……… 103
3.4.1　截面设定 ……… 103

3.4.2 模型半透明显示 …………………… 106
3.4.3 速度矢量图显示 …………………… 108
3.4.4 流体截面温度云图显示 ……… 109
3.4.5 固体温度云图结果显示 ……… 114
3.4.6 获取散热器平均温度 ………… 116
3.4.7 窗口文本显示设定 …………… 119
3.4.8 非定常显示输出的设定 ……… 121
3.4.9 计算结果曲线 ……………………… 127
第4章 小汽车外流场计算 ……………… 129
4.1 模型处理及网格划分 ………… 129
4.1.1 导入车体模型 ……………………… 130
4.1.2 包面前的模型处理 …………… 131
4.1.3 包面操作 …………………………… 142
4.1.4 Remesh 操作 ……………………… 144
4.1.5 生成体网格 ………………………… 147
4.2 求解 ……………………………………… 163
4.2.1 边界条件设置 ……………………… 163
4.2.2 计算模型 …………………………… 165
4.2.3 监测曲线的设定 ………………… 166
4.3 后处理 …………………………………… 172
4.3.1 计算结果的统计 ………………… 172
4.3.2 车体表面压力分布的显示 …… 172
4.3.3 汽车中间截面流场的显示 …… 174
第5章 列车空气动力学性能计算 …… 179
5.1 模型处理及网格 ………………… 180
5.1.1 车体模型的导入和组装 ……… 180
5.1.2 面网格生成和检查 …………… 187
5.1.3 体网格生成和检查 …………… 193
5.2 求解 ……………………………………… 209
5.2.1 计算条件设置 ……………………… 209
5.2.2 监测曲线和监测点的设定 …… 212
5.2.3 求解参数设置 ……………………… 220
5.3 后处理 …………………………………… 223
5.3.1 计算结果的统计 ………………… 223
5.3.2 车体表面压力分布的显示 …… 225
5.3.3 车体表面区域的流场显示 …… 226
5.3.4 车体流线的动画显示 ………… 229
5.3.5 计算结果的导出 ………………… 234
5.4 高速列车横风性能研究 ……… 235
5.4.1 边界条件设置 ……………………… 236
5.4.2 计算结果分析 ……………………… 237
5.4.3 侧风条件下的压力分布和流场显示 …………………………………… 240
第6章 Fieldview 软件介绍 ………… 244
6.1 Fieldview 菜单栏的介绍 ……… 245
6.1.1 File 菜单 …………………………… 245
6.1.2 Edit 菜单 …………………………… 246
6.1.3 View 菜单 ………………………… 246
6.1.4 Visualization Panels 菜单 ……… 247
6.1.5 Tools 菜单 ………………………… 247
6.1.6 Help 菜单 ………………………… 248
6.2 Fieldview 左侧工具栏介绍 …… 248
6.3 其他工具 ……………………………… 250
6.4 Fieldview 使用案例 …………… 252
6.4.1 散热器热性能计算后处理 …… 252
6.4.2 F18 流场显示 ……………………… 261

第 1 章　计算流体力学基础

1.1　流体力学的基本概念

1. 连续介质

1753 年，欧拉提出连续介质模型，即采用“连续介质”作为宏观流体模型，将流体看作由无限多流体质点所组成的稠密而无间隙的连续介质。也可以理解成，流体质点是指几何尺寸同流动空间相比是极小量，又含有大量分子的微元体。气体与液体均属于流体。

流体的密度定义为

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1-1}$$

式中　ρ——流体密度（kg/m^3）；

m——流体质量（kg）；

V——流体体积（m^3）。

对于气体，一般由气体状态方程定义：

$$pV = \rho RT \tag{1-2}$$

式中　p——气体压强（Pa）；

V——气体体积（m^3）；

ρ——气体密度（kg/m^3）；

R——气体常数，空气的 R 值为 287J/（kg·K）；

T——气体温度（K）。

2. 流体的导热性

流体的导热性是指当流体内部或流体与其他介质之间存在温度差时，温度较高区域与温度较低区域之间存在热量传递的现象。

热量传递有导热、对流和热辐射三种方式。流体流过壁面时，紧贴壁面的位置会形成层流底层，流体在该处流速很低，几乎可看作为零，故此处流体与壁面进行的是导热过程；层流之外的区域热传递方式主要是对流传热过程。

（1）导热　单位时间内通过某一给定面积的热量称为热流量。当物体的温度仅在 x 方向发生变化时，按照傅里叶定律（又称导热基本定律），热流密度的表达方式为

$$q = \frac{\Phi}{A} = -\lambda \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} \tag{1-3}$$

式中　q——热流量（W/m^2）；

Φ——总换热量（W）；

A——换热面积（m^2）；

λ——导热系数[W/（m·K）]；

$\frac{dT}{dx}$——沿 x 方向的温度梯度(K/m)，x 为面积的法线方向；

负号“-”表示热量传递方向与温度梯度方向相反。

（2）对流　通常情况下，流体与固体表面间的对流换热量可用下式表达：

$$q = h(T_1 - T_2) \tag{1-4}$$

式中　q——热流量(W/m^2)；

h——换热系数[$W/(m^2 \cdot K)$]；

$T_1 - T_2$——流体与固体的温度差(K)。

（3）热辐射　一切实际物体的辐射能力都小于同温度下的黑体。实际物体辐射热流量的计算总可以采用斯特潘-波耳兹曼定律的经验修正公式：

$$\Phi = \varepsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \tag{1-5}$$

式中　Φ——总换热量(W)；

ε_1——物体 1 的发射率(又称黑度)，其值总小于 1；

A_1——物体 1 的辐射面积(m^2)；

σ——斯特潘-波耳兹曼常量(又称黑体辐射常数)，是个自然常数，$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$；

T_1、T_2——物体 1 和物体 2 的温度(K)。

3. 流体的粘性

流体的粘性是指在做相对运动的两流体层的接触面或流体与固体的接触面上，存在一对等值且反向的力阻碍流体运动的现象。其产生的原因是由于存在分子不规则运动的动量交换和分子间吸引力。由粘性产生的作用力即粘性阻力，又称内摩擦力。牛顿内摩擦定律定义的两层流体间切应力的表达式为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \tag{1-6}$$

式中　τ——切应力(N)；

μ——动力粘性系数，与流体物性和温度有关[$kg/(m \cdot s)$]；

$\frac{du}{dy}$——垂直于两层流体接触面上的速度梯度(1/s)。

粘性系数受温度的影响很大，当温度降低时，液体的粘性系数增大，粘性增强；而气体的粘性系数和粘性则均降低。在压强不是很高的情况下，粘性系数受压强的影响较小。

4. 可压流体与不可压流体

根据密度 ρ 是否为常数，可将流体分为可压流体与不可压流体两大类。当密度 ρ 为常数时，流体为不可压流体。一般水为不可压流体，空气为可压流体。有些可压流体在特定的流动条件下，可按不可压流体处理。

不可压流体的压力场是通过连续方程间接描述的，由于没有直接求解压力的方程，不可压流体的流动方程的求解尤为困难。

在可压流体的连续方程中含密度 ρ，因而把密度 ρ 视为连续方程中的独立变量进行求解，再根据气体的状态方程求出压力。

5. 层流流动与湍流流动

对于管内流动，科学家根据大量实验数据与相似理论得出，流动状态是由综合反映管道尺寸、流体物理属性、流动速度的组合量——雷诺数 Re 来决定的。雷诺数 Re 定义为

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \tag{1-7}$$

式中　ρ——流体密度（kg/m^3）；

u——平均流速（m/s）；

d——管道直径（m）；

μ——动力粘性系数［kg/（m·s）］。

区分层流流动与湍流流动涉及临界雷诺数的概念。其中，由层流转变为湍流时所对应的雷诺数称为上临界雷诺数，用 Re'_{cr} 表示；由湍流转变为层流时所对应的雷诺数称为下临界雷诺数，用 Re_{cr} 表示。通过比较实际流动的雷诺数 Re 与两个临界雷诺数，即可确定粘性流体的流动状态。比较准则如下所示：

当 $Re < Re_{cr}$ 时，流动为层流状态。

当 $Re > Re'_{cr}$ 时，流动为湍流状态。

当 $Re_{cr} < Re < Re'_{cr}$ 时，流动可能为层流状态，也可能为湍流状态。一般称之为过渡状态。

在工程应用中，一般统一取临界雷诺数 $Re_{cr} = 2300$，当 $Re < 2300$ 时，流动为层流流动；而当 $Re > 2300$ 时，可认为流动为湍流流动。

6. 定常流与非定常流

根据流体流动的物理量（如速度、压力、温度等）是否随时间变化，可将流动分为定常流与非定常流两大类。当物理量不随时间变化，即 $\frac{\partial()}{\partial t} = 0$ 时，流动为定常流动；当流动的物理量随时间变化，即 $\frac{\partial()}{\partial t} \neq 0$ 时，流动为非定常流动。定常流动也称为恒定流动或稳态流动；非定常流动也称为非恒定流动、非稳态流动或瞬态流动。

1.2　计算流体力学的基本概念

计算流体力学（CFD）是一种由计算机模拟流体流动、传热及相关传递现象的系统分析方法和工具。目前已广泛涵盖了高速铁路行业、汽车和航空业的空气动力学领域（升力、阻力和倾覆力矩等）和内部流场分析、热管理等；电子和电器行业的电子设备换热分析（如冷板、换热器等的流动及传热计算）；建筑物的内外环境流场及换热分析（如风载荷、通风等）；流体机械的仿真分析（包括泵、风机等）；此外，在化学过程分析、环境工程、气象分析等方面也有较多应用。

CFD 的基本思想是：把原来在时间域和空间域上连续的物理量场，用一系列离散点上的变量值的集合来代替，并通过一定的原则和方式建立起反映这些离散点上场变量之间关系的代数方程组，然后求解代数方程组获得场变量的近似解。

1. CFD 计算流程

CFD 计算主要包括前处理、求解和后处理三部分。

（1）前处理　据统计，CFD 计算中，前处理一般要占一半以上的时间，主要用于模型修整、面网格生成、体网格生成和计算域、边界条件的设定等。前处理阶段用户需要进行的工作包括：

① 定义所求问题的几何计算域。

② 将计算域划分为多个互不重叠的子区域，形成由单元组成的网格。

③ 对所要研究的物理或化学现象进行抽象，选择相应的控制方程。

④ 定义流体的属性参数。

⑤ 为计算域边界处的单元指定边界条件。

⑥ 对于瞬态问题，指定初始条件。

（2）求解　目前各 CFD 软件采用的求解技术主要有有限差分法、有限元法、谱方法和有限体积法。这些方法均按如下步骤运行：采用简单函数来近似表示未知的流动变量；将近似函数代入流动控制方程和所得到的数学式进行离散化；求解代数方程。其差别主要在于流动变量的近似方法和离散化过程的不同。

目前流动和传热问题中最有效的数值计算方法是有限体积法，该方法又称为控制体积法，是一项经过校核且发展很好的通用 CFD 技术，多数 CFD 软件(如 STAR-CCM +、FLUENT、CFX、PHOENICS)都采用此方法为核心算法。其基本思想为：将计算区域划分为网格，并使每个网格点周围有一个互不重复的控制体积；将待解的偏微分方程对每一个控制体积积分，从而得出一组离散方程，其中的未知量是网格点上的特征变量。为求出控制体积的积分，必须假定特征变量值在网格点之间的变化规律。从积分区域的选取方法来看，有限体积法属于加权余量法中的子域法；从未知解的近似方法来看，有限体积法属于采用局部近似的离散方法。简而言之，有限体积法的基本思想就是子域法加上离散。

有限体积法主要包括以下求解步骤：

① 在计算域的所有控制容积内对流动控制方程进行积分。

② 离散化网格，将积分方程中的对流项、扩散项和源项用有限差分公式来近似表示，将积分方程转变为代数方程组。

③ 迭代求解该代数方程组。

（3）后处理　由于计算机技术的不断进步，CFD 软件提供的数据可视化技术和工具越来越多，如：计算域和网格显示、等值线图(云图,包括压力云图、温度云图、速度云图等)、矢量图(如速度矢量图)、视角变换(平移、缩放、旋转)、颗粒追踪、动画输出等。

2. 离散化

离散化是指将求解区域的空间分割为网格，以网格上的离散的值来近似空间上连续的值。每一个解析网格即一个控制体，如图 1-1 所示。

计算时，从边界条件处获得物理量的值，在相邻网格之间有着质量、动量和能量的传递。随着计算的推进，得到全部网格上流速、压力和密度等物理量的值，如图 1-2 所示。

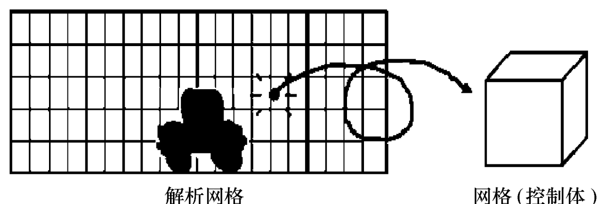


图 1-1　控制体

以网格上离散的值构建差分方程的方法称为差分格式，离散网格上的差分

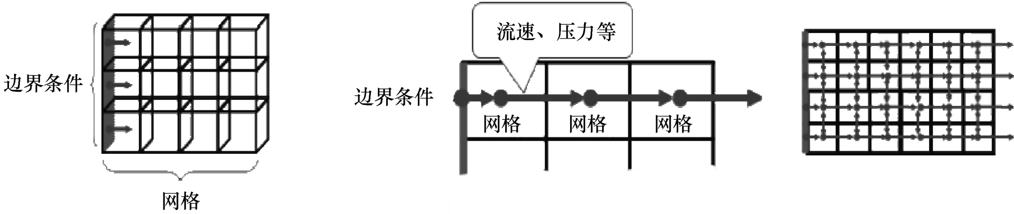


图 1-2　离散化的原理

方程是连续空间上的微分方程的近似。使用不同的差分格式，计算的精度、稳定性都有变化。

理想的离散格式要求既具有稳定性，又具有较高精度，同时还能适应不同的流动形式。但实际上这种离散格式很难实现。表 1-1 列出了几种常用离散格式的性能对比，其中 *Pe* 数表征某点处的对流和扩散的强度比例。

表 1-1　常用离散格式的性能对比

离 散 格 式	稳定性及条件	精度与经济性
中心差分	条件稳定 $Pe\leqslant 2$	在不发生振荡的前提下，可获得较准确的计算结果
一阶迎风	绝对稳定	当 *Pe* 较大时，假扩散严重。为避免此问题，需要加密网格
混合格式	绝对稳定	当 $Pe\leqslant 2$ 时，性能同中心差分；当 $Pe>2$ 时，性能同一阶迎风
指数格式	绝对稳定	精度高，主要适用于无源项的对流扩散问题
乘方格式	绝对稳定	性能同指数格式，但比指数格式省时
二阶迎风	绝对稳定	比一阶迎风精度高，仍有假扩散问题
QUICK	条件稳定 $Pe\leqslant 8/3$	可减少假扩散误差，精度较高，应用广泛
改进的 QUICK	绝对稳定	性能同 QUICK 格式，不存在稳定性问题

在表 1-1 的基础上，可总结出以下规律：

1）在满足稳定性条件的前提下，一般截断误差阶数较高的格式具有较高的计算精度。如具有三阶截断误差的 QUICK 格式，通常可以获得较高的计算精度。在选用低阶截断误差格式时，注意应将网格划分得足够密，以减少假扩散影响。

2）稳定性与精确性常常互相矛盾。精确度较高的格式，如 QUICK 格式等，都不是无条件稳定，而假扩散现象相对严重的一阶迎风格式则是无条件稳定。其中的一个原因是，为提高离散格式的截断误差等级，通常需要从所研究的节点两侧取用一些节点来构造该节点上的导数计算式，而当导数计算式中出现下游节点且其系数为正时，迁移特性遭到破坏，因此格式只能是条件稳定。

3）一阶和二阶差分格式均可应用于二维和三维问题。

3. 流体力学的研究方法

CFD 解析方法采用数值方程式表示实际流体。为使其简化，往往采用位势流理论、边界层近似、完全气体近似等，进而导入相应的湍流数学模型并进行数值计算。由于计算是基于对实际流体的近似进行，故应考虑计算前提近似的影响，根据计算结果的精确度、可信性、计算机条件和计算经验等确定合适的数值解法。然后编写程序代码，利用计算机进行求

解计算和后处理。

数值计算方法的实质是把描述空气运动的连续介质数学模型离散成大型代数方程组，建立可在计算机上求解的算法。通过偏微分方程的离散化和代数化，将无限信息系统变为有限信息系统(离散化)，把偏微分方程变为代数方程(代数化)，再通过采用适当的数值计算方法，求解方程组，得到流场的数值解。离散的实质解通常以两种形式给出：网格上的近似值，如差分法；单元中易于计算的近似表达式，如有限元、边界元等。

CFD 是建立在全 Navier—Strokes 方程(简称 N-S 方程)近似解基础上的计算技术。根据近似解的精度等级，把 N-S 方程的解法分为以下四类：

① 线性非粘性流方法。

② 非线性非粘性流方法。

③ 平均雷诺数基础上的 N-S 方程解法。

④ 全 N-S 方程解法。

CFD 数值计算方法主要包括有限差分法(FDM)、有限元法(FEM)、边界体积法(BIM)等。其中，有限差分法包括有限体积法(FVM)、流线曲率法(SCM)、质量网格法(PIC)、流体网格法(FLIC)等，这些方法均为有限差分法的一种或其变形的一种方法。三种方法的比较如表 1-2 所示。

表 1-2　三种 CFD 数值计算方法的比较

比　较　项	有限差分法	有 限 元 法	边界体积法
网格分割	规则的格子普遍用于边界的网格分割	可自由地分割为三角形、四边形、三棱柱、六面体等网格	边界的面元分割
建立一次方程式的系数行列	大型、带成分不密集的行列	大型、带成分不密集的行列	小型、成分密集的行列
主要特征	最基本的标准解法	精确度高，对已有程序使用方便，计算量大	输入数据少
适用性	适用性广，用于伴有冲击波的超声速流边界层流，LES 计算	适用于复杂形状的边界	定常流中的流体自由表面流

由于有限体积法应用较为广泛，也有人将 CFD 数值计算方法分为有限差分法、有限元法、有限体积法三类。

流场计算分析中求解 N-S 方程的应用情况如表 1-3 所示。

表 1-3　流场计算分析中求解 N-S 方程的应用情况

假　设	导 出 方 程	CFD 方法	假　设	导 出 方 程	CFD 方法
无粘流	欧拉方程	欧拉法	时均流	雷诺方程	k-Epsilon 模型 低雷诺数 k-Epsilon 模型 各向同性 k-Epsilon 模型 雷诺应力模型
无旋流	拉普拉斯方程	涡格法 边界层法 面元法	空间平均		大涡模型
			无处理		直接模型

1.3　流体运动及换热的基本控制方程

散热器内的空气流动、小汽车和高速动车组外流场的空气流动特性，其实质均是流体流动与换热问题。流体运动是最复杂的物理行为之一，与结构设计领域中应力分析等问题相比，其建模与数值模拟要困难得多。然而，对任何复杂的湍流流动，N-S方程都是适用的。流体运动及换热的控制方程为

连续方程 $$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{1-8}$$

式中　ρ——流体的密度；

u_i——流体速度沿 i 方向的分量。

动量方程 $$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}+\rho g_i+F_i \tag{1-9}$$

式中　p——静压力；

τ_{ij}——应力矢量；

ρg_i——i 方向的重力分量；

F_i——由于阻力和能源而引起的其他能源项。

能量守恒方程 $$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h)=\frac{\partial}{\partial x_i}(k+k_t)\frac{\partial T}{\partial x_i}+S_h \tag{1-10}$$

式中　h——熵；

k——分子传导率；

k_t——由于湍流传递而引起的传导率；

S_h——定义的体积源。

由以上的质量守恒、动量守恒及能量守恒方程可知，共有 u、v、w、p、T、ρ 6个未知量，为了使方程组封闭，还需要补充一个联系 p 和 ρ 的状态方程(1-2)。

湍流流动是非常复杂的流动，计算湍流运动时，需要附加湍流方程。模型方程的选取要视具体情况而定，在此以 k-ε 双方程模型为例。

标准 k-ε 模型是半经验公式，主要是基于湍流动能和扩散率。湍流动能方程——k 方程是个精确方程，而湍流耗散率方程 ε 方程是个由经验公式导出的方程。如不考虑用户自定义的源项时，标准 k-ε 模型方程如式(1-11)和式(1-12)所示。

湍流动能 k 方程

$$\rho\frac{\mathrm{D}k}{\mathrm{D}t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu_l+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon \tag{1-11}$$

湍流耗散率 ε 方程

$$\rho\frac{\mathrm{D}\varepsilon}{\mathrm{D}t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{1-12}$$

式中　μ_l——层流粘性系数；

μ_t——湍流粘性系数。

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{1-13}$$

式中 G_k——由层流速度梯度而产生的湍流动能；
G_b——由浮力产生的湍流动能；
$C_{1\varepsilon}$，$C_{2\varepsilon}$，$C_{3\varepsilon}$，σ_k和σ_ε——经验常数；
C_μ——湍流常数。

有效的粘性系数

$$\mu = \mu_t + \mu_l \tag{1-14}$$

k-ε 模型假定流场完全是湍流，分子之间的粘性可以忽略。因而标准 k-ε 模型只对完全湍流的流场有效。

模型常量是从空气、水的基本湍流试验中得来的，一般取值为

$$C_{1\varepsilon} = 1.44,\ C_{2\varepsilon} = 1.92,\ C_\mu = 0.99,\ \sigma_k = 1.0,\ \sigma_\varepsilon = 1.3$$

以上方程组是非线性二阶偏微分方程组，对大多数工程问题，无法获得精确解析解，只能用 CFD 数值模拟的方法求解。数值方法的实质是离散化和代数化。数值计算就是将描述物理现象的偏微分方程在一定的网格系统内离散，用网格节点处的场变量值近似描述微分方程中各项所表示的数学关系，按一定的数学原理构造与微分方程相关的离散代数方程组，引入边界条件后求解离散代数方程组，得到各网格节点处的场变量分布，用这一离散的场变量分布近似代替原微分方程的解析解。

1.4 湍流模型

层流和湍流是流体运动的两种基本形式。1883 年，雷诺揭示了粘性流动这两种不同本质的流动形态。自此，世界各国学者对湍流进行了持续研究，取得不少进展，解决了很多工程领域的难题。但由于湍流运动极其复杂，其基本机理至今未能完全掌握，而且不能准确地定义并定量地给出湍流的运动特性。目前，一般将湍流的主要特征归结为随机性、扩散性、有涡性和耗散性。

湍流出现在速度变动的地方，这种波动引起流体介质之间动量、能量和浓度的变化，而且引起了数量的波动。由于这种波动是小尺度、高频率的，所以若在实际工程计算中直接模拟，对计算机的要求会很高。实际上瞬时控制方程可能在时间上、空间上是均匀的，或者可以人为地改变尺度，这样修改后的方程耗费较少的计算量。但是，修改后的方程可能包含有我们所不知的变量，湍流模型需要用已知变量来确定这些变量，目前能够用于工程计算的湍流数值计算方法是雷诺平均方法，即只计算大尺度平均流动，所有湍流脉动对平均流动的作用，用湍流模式理论加以封闭，使计算量大为减少。在各种湍流模式中，涡粘性湍流模型在工程计算中应用尤为广泛，但由于目前的湍流模型基本上都是基于低速不可压缩模式发展的，工程中一般选用广为应用的标准 k-ε 模型。

湍流流动受壁面影响很大，很明显平均流动区域将由于壁面不光滑而受到影响。当然，湍流还受到壁面产生的其他影响。在离壁面很近的地方，粘性力将抑制流体切线方向速度的变化，而且流体运动受壁面阻碍从而抑制了正常的波动。

在近壁面的外部区域，湍流动能受平均流速的影响而增大，湍流运动加剧。LES 模型仅适用于湍流核心区域(一般都远离壁面)，应该考虑怎样使这些模型适用于壁面边界层处的流动。如果近壁面的网格划分足够好，Spalart-Allmaras 和 k-ω 模型可以解决边界层的流动。

1.5　近壁面模型

前面介绍的 $k\text{-}\varepsilon$ 模型是针对充分发展的、高 Re 数的湍流模型。但对于近壁区的流动，Re 数较低，湍流发展并不充分，湍流的脉动影响不如分子粘性的影响大。要对近壁区内的流动进行模拟计算，则必须对前面所述的 $k\text{-}\varepsilon$ 方程进行修正。壁面函数法和低 Re 数 $k\text{-}\varepsilon$ 模型均可有效解决近壁区及低 Re 数情况下的流动计算问题。

在无滑移壁面附近，存在很强的变量梯度。此时，粘性效应对输运过程有很大影响，在数值模拟过程中就需考虑壁面的粘性效应和边界层内快速变化的变量的求解这两大问题。

实验研究表明，对于在固体壁面上充分发展的湍流流动，沿壁面法线方向，可将流动区域划分为壁面区和核心区。核心区的流动可以认为是完全湍流区。壁面区又可分为粘性底层、过渡层和对数律层。

粘性底层在最里层，又叫粘性力层，流动区域很薄，在这个区域里，粘性力在动量、热量及质量交换中都起主导作用，湍流切应力可以忽略，因此流动几乎是层流流动，平行于壁面的速度分量沿壁面法线方向呈线性分布。

过渡层处于粘性底层的外面，其中粘性力与湍流切应力作用相当，流动状况比较复杂，很难用一个公式或定律来表述。由于过渡层的厚度极小，故计算中将其归入对数律层。

对数律层处于最外层，其中粘性力的影响不明显，湍流切应力占主导地位，流动处于充分发展的湍流状态，流速分布接近对数关系。

为建立壁面函数，现引入两个无量纲参数 u^+ 和 y^+，分别表示速度和距离，即

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \tag{1-15}$$

$$y^+ = \frac{\Delta y \rho u_\tau}{\mu} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \tag{1-16}$$

式中　u——流体的时均速度；

u_τ——壁面摩擦速度，$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$；

τ_w——壁面切应力；

Δy——到壁面的距离。

大量试验表明，近壁面区域可以分成三层。如图 1-3 所示，以 $\ln y^+$ 为横坐标，u^+ 为纵坐标，将壁面区内划分为三个子层及核心区内的流动。图 1-3 中的小三角形及小空心圆代表在两种 Re 数下实测得到的速度值 u^+，直线代表对速度进行拟合后的结果。

根据普朗特的边界层理论，粘性较小的流体绕流物体时，粘性的影响仅限于贴近物面的薄层内，而在这薄层之外可以忽略。在这个薄层内，形成一个从固体壁面速度为零到外流速度的速度梯度区，这一薄层即边界层。

合适的边界层网格分布是用好湍流模型的关键因素之一。边界层网格质量的控制可通过控制 y^+ 值范围来实现，一般对于壁面函数法，要求 $20 < y^+ < 100$；对低雷诺数模型，要求 $y^+ < 2$。根据要控制的 y^+ 值范围，可确定边界层内网格节点和壁面间的最小距离 Δy，按式(1-17)确定。

$$\Delta y=\frac{\sqrt{80}Ly^{+}}{Re_L^{13/14}} \tag{1-17}$$

式中 L——特征长度(m)；

Re_L——特征长度处对应的雷诺数。

假设近壁面的速度分布符合对数函数，可以在边界层内计算得出流体的剪切应力。该函数即壁面函数。通常，近壁面区域流动分析有两种方法：壁面函数法和低 Re 数 k-ε 模型法。

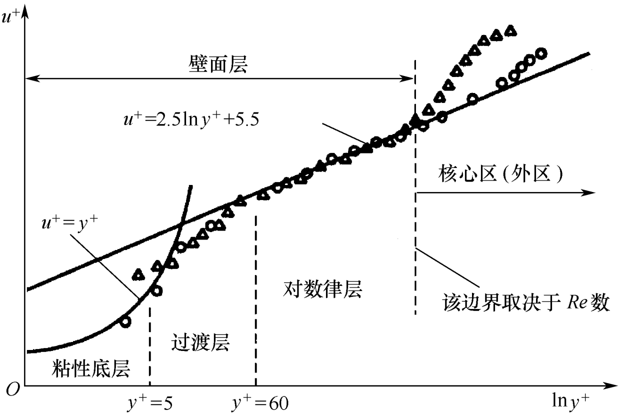


图 1-3 壁面区三个子层的划分与相应的速度

(1) 壁面函数法 采用壁面函数法的半经验公式可解决壁面对流动的影响，对受粘性力影响的区域(粘性力层及过渡层)，其壁面方程的运用能够很好地修正湍流模型。对于大多数高雷诺数的流动，壁面函数法能充分节省计算资源，因为在近壁面粘性力影响区域，由于变量变化太快，不需要解决，这种方法经济、实用而且很精确，很受欢迎。

壁面函数法的基本思想为：对于湍流核心区的流动采用 k-ε 模型求解，而不求解壁面区，换为直接采用半经验公式将壁面上的物理量与湍流核心区内的求解变量联系起来，这样不经过对壁面区内的流动进行求解，就可以直接得到与壁面相邻控制容积的节点变量值。

在划分网格时，壁面函数法不需要加密壁面区，只需要将第一个内节点布置在对数律成立的区域内，即放置到湍流充分发展区域，如图 1-4a 所示。图中阴影部分为壁面函数公式有效的区域，在阴影以外的网格区域则为采用高 Re 数 k-ε 模型进行求解的区域。壁面函数如同一架桥梁，将壁面值同相邻控制容积的节点变量值联系起来。

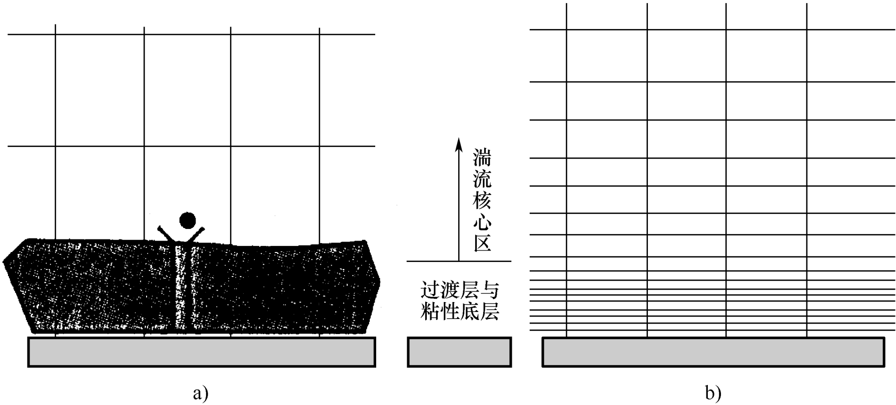


图 1-4 求解壁面区流动的两种方法所对应的计算网格

a）壁面函数法对应的计算网格 b）低 Re 数 k-ε 模型对应的计算网格

(2) 低 Re 数 k-ε 模型法 壁面函数法的表达式主要根据简单平板流动边界层的试验资料归纳获得，并未对壁面区内部尤其是粘性底层内的流动进行细致研究，分子的粘性作用没有得到充分考虑。为了能够让基于 k-ε 模型的数值计算能从高 Re 数区域一直延伸到固体壁

面上（该处 Re 数为零），有学者提出低 Re 数的流动主要体现在粘性底层中，流体的分子粘性起着绝对重要的作用，因此必须对高 Re 数 k-ε 模型进行以下三方面的修正，才能使其可用于计算各种 Re 数区域的流动。

① 为体现分子粘性的影响，控制方程的扩散系数项必须同时包括湍流扩散系数与分子扩散系数两部分。

② 控制方程的有关系数必须考虑不同流态的影响，即在系数计算公式中引入湍流雷诺数。

③ 在 k 方程中考虑壁面附近湍动能的耗散不是各向同性这一因素。

对于壁面边界，通常指定壁面处流体的切向速度 u 为零，即壁面无滑移边界条件；与壁面垂直的速度 v，由于在壁面附近 $\frac{\partial u}{\partial x}\approx 0$，根据连续性方程，$\frac{\partial v}{\partial y}\approx 0$。对于无粘性流动，流体在壁面处无剪切运动，即壁面为滑移边界条件，在 STAR-CCM + 中，设置滑移边界处，控制体界面上的剪切动量通量和温度梯度为零。

在固体壁面的粘性底层中，流动与换热的计算可以采用低雷诺数 k-ε 模型或壁面函数法。采用低雷诺数 k-ε 模型时，要在粘性底层中布置比较多的节点。采用高雷诺数 k-ε 模型，在粘性底层内不布置任何节点，把与壁面相邻的第一个节点布置在旺盛湍流区域内。

用壁面函数来表示边界层的速度、温度、湍流能量等物理量的分布。在边界层区域，流体的湍流效应十分显著，高雷诺数模型在此区域内就不再适用了，有时为了减少在壁面附近网格的数量，又不得不采用高雷诺数 k-ε 模型，故采用壁面函数法来计算壁面处的湍流物理量。

1.6　CFD 求解计算的方法

流场计算求解的本质是对离散方程组的求解。离散方程组的求解方法包括耦合求解法和分离求解法两种，具体如图 1-5 所示。

1. 耦合求解法

耦合求解法最大的特点为联立求解离散方程组以获得各变量值（u、v、w、p），具体求解过程如下：

1）假定初始压力和速度，确定离散方程的系数和常数项。

2）联立求解连续方程、动量方程、能量方程。

3）求解湍流方程及其他方程。

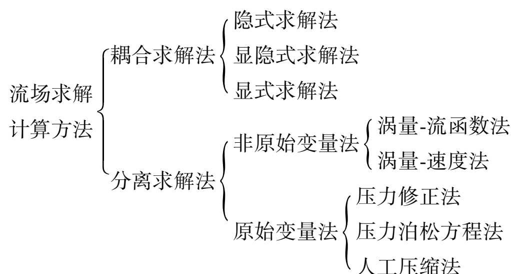


图 1-5　离散方程组的求解方法

4）判断当前时间步上的计算是否收敛。如不收敛，返回至第 2）步，进行迭代计算；如收敛，重复以上步骤，计算下一时间步的各物理量值。

耦合求解法可分为隐式求解法（所有变量整场联立求解）、显隐式求解法（部分变量整场联立求解）和显式求解法（在局部地区，如某个单元，对所有变量联立求解）。对于显式求解法，在求解某个单元时，通常要求相邻单元的物理量值已知。

耦合求解法计算效率低，内存消耗大。当流体的密度、能量、动量存在相互依赖关系时，采用耦合式解法具有较大优势，适于高速可压流动等。耦合式解法中，隐式求解法应用较为普遍，而显式求解法仅用于动态性极强的场合，如激波捕捉等。

2. 分离求解法

分离求解法不直接求解联立方程组，而是按照顺序逐个求解各变量的离散方程组。根据是否直接求解原始变量（u、v、w、p），又可分为非原始变量法和原始变量法两大类。

非原始变量法包括涡量-流函数法和涡量-速度法两种。

涡量-流函数法不直接求解原始变量 u、v、w 和 p，而是求解旋度 ω 和流函数 Ψ；涡量-速度法不直接求解流场的原始变量 p，而是求解旋度 ω 和速度 u、v、w。这两种方法的共同点为：

1）方程中不出现压力项，可避免因求解压力带来的问题。

2）由于三维流动不存在流函数，不易扩展到三维情况。

3）对于固壁面边界计算，其上的旋度极难确定，没有适宜的固体壁面上的边界条件，往往使得涡量方程的数值解发散或不合理。

原始变量法包括压力泊松方程法、人工压缩法和压力修正法等。

压力泊松方程法通过对方程取散度，将动量方程转变为泊松方程，然后求解泊松方程。人工压缩法主要是受到可压缩性气体可以通过联立求解速度分量与密度的方法来求解的启发，引入人工压缩性和人工状态方程，以此对不可压流体的连续性方程进行修正，并引入人工密度项，将连续性方程转化为求解人工密度的基本方程。但这种方法要求时间步长必须很小，因而限制了其应用范围。

压力修正法是目前工程上使用最为广泛的流场求解计算方法。其实质是迭代法，即在每一时间步长的运算中，先给出压力场的初始值，进而求出速度场。再求解根据连续方程导出的压力修正方程，对假设的压力场和速度场进行修正。如此循环往复，以求得压力场和速度场的收敛解。

压力修正法有多种实现方式，其中，压力耦合方程组的半隐式方法（SIMPLE 算法）应用最为广泛，也是各种 CFD 软件普遍采用的算法。

3. SIMPLE 求解方法

SIMPLE 算法（Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations）是一种半隐式分离求解法，也是目前最常用的基于有限体积法的求解方法。其基本思想是利用计算网格把流动区域分为离散的控制体积；在每个控制体积上积分控制方程，形成诸如速度、压力、温度等的未知离散变量的代数方程；把离散的非线性方程组线性化；求解该方程组，得到更新的变量值。在此，把数值解定义在网格中点（格心）上。在离散方程时，对流项采用二阶迎风格式，粘性项采用二阶中心差分格式。

每一次计算迭代的步骤如下：

1）计算结果是在目前的基础上不断更新。开始时，计算变量以初始流场为基础开始更新计算。

2）利用目前的压力值和表面质量流量，依次求解三个速度分量 u、v、w 的动量方程，以获得新的速度流场。

3）由于新获得的速度流场可能不满足连续方程，这时求解由连续方程和动量方程线性

化而推导出来的压力纠正方程，从而对压力、速度场和表面质量流量产生必要的纠正，以满足连续方程。

4）利用其他变量更新的数值求解湍流模型方程及辐射方程。

5）检查方程的收敛精度是否满足要求。

如果不满足收敛精度，重新迭代计算，直到满足收敛精度为止。

1.7　网格简介

计算网格的合理划分和高质量是 CFD 计算的前提条件。即使在 CFD 技术高度发达的国家，网格生成仍占整个 CFD 计算任务所需人力时间的 60%~80%。目前，随着硬件资源的更新换代，计算能力不断提高，复杂外形的网格生成技术已经成为 CFD 技术推广的一个巨大障碍，同时也是影响 CFD 计算的关键技术之一。网格品质的好坏直接影响到数值解的计算精度，而且这种影响在许多情况下是决定性的。因此网格生成受到世界各国 CFD 工作者和工业部门的重视。

采用数值方法求解控制方程时，首先是将控制方程在空间区域上进行离散，然后求解得到离散方程组。而要将控制方程进行空间离散，就要划分网格。现已发展出多种区域离散化的网格生成方法，统称为网格生成技术。网格生成技术是计算流体力学中重要的组成部分，为了得到高精度数值结果，除了高精度的数值算法外，网格的优劣也有重要的影响。

按网格点之间的相邻关系，可将计算网格分为结构化网格、非结构化网格和混合网格。混合网格是结构网格和非结构网格的混合。

1.7.1　结构化网格

结构化网格如图 1-6 所示，网格点之间的邻接是有序而规则的，除了边界点外，内部网格点都有相同的邻接网格数(一维为 2 个、二维为 4 个、三维为 6 个)。结构化网格的拓扑结构具有严格的有序性。网格的定位能够用空间上的三个指标 i、j、k 识别，且网格单元之间的拓扑连接关系是简单的 i、j、k 递增或递减的关系，在计算过程中不需要存储它的拓扑结构。当流动区域易于被结构化网格所剖分、流动结构不需要作自适应处理时，结构化网格被研究者广泛采用。



图 1-6　结构化网格

对于结构化网格，按拓扑结构不同一般可以分为 O 形、C 形和 H 形三种，如图 1-7 所

示。O 形拓扑结构适合于两端都是钝截面的物体，如圆形或椭圆形截面物体；C 形拓扑结构适合于一端是钝头而另一端是尖截面的物体，如锥形截面物体；H 形拓扑结构适合于两端都是尖截面的物体，如菱形截面的物体。

采用不同的网格拓扑结构生成的网格形状不同，网格的计算效率也有差异，因此要生成网格首先要分析其网格的拓扑结构。

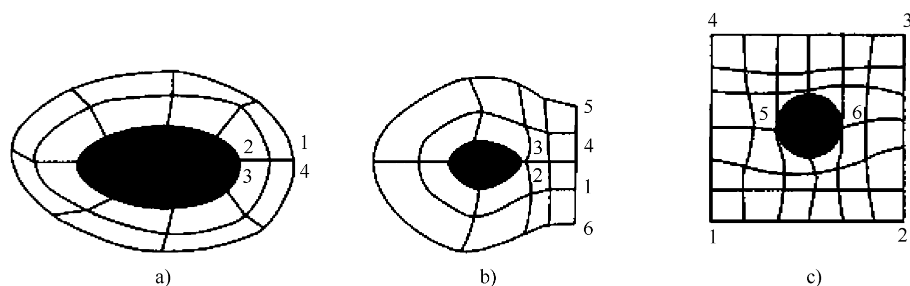


图 1-7 三种网格示意图

a）O 形网格 b）C 形网格 c）H 形网格

结构化网格数据组织方便，计算效率和计算精度高。随着近几十年在结构网格生成技术方面的不断突破，目前发达国家各主要飞机公司，如波音、空客和 MBB 等，用于军机、民机型号气动设计的骨干软件都采用结构化网格。结构化网格的拓扑结构相当于矩形域内的均匀网格，其节点定义在每一层的网格线上，因而其存储比较简单，所需的存储空间也相对较少。但它对复杂几何外形的网格生成比较困难。

1. 7. 2 非结构化网格

非结构化网格节点之间的邻接是无序的、不规则的，每个网格点可以有不同的邻接网格数。非结构化网格如图 1-8 所示。

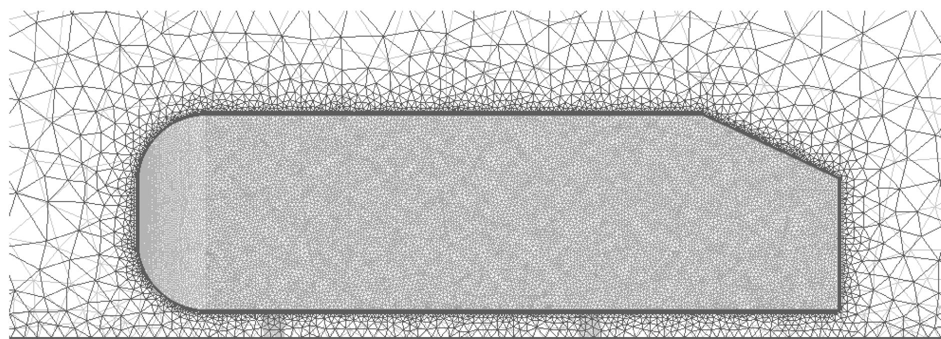


图 1-8 非结构化网格

与结构化网格相比，非结构化网格有以下优点：

1）能够离散具有复杂外形的区域，因为非结构化网格单元可以在任意计算区域中完全填充到整个空间，能相当精确地表示出物体的边界，从而保证了在边界处的初始准确度。

2）能够快速地在网格中增加、删除节点，处理动边界问题比较方便。

3）能够很容易地采用自适应网格方法，来提高解的质量。

当然，非结构化网格生成方法也存在先天的不足，那就是它需要较大的内存空间和较长的 CPU 时间，计算分辨率较差，且不适于粘性流场的求解。目前，非结构网格方法已广泛应用于定常气动流场数值模拟之中。

非结构化网格的划分方法大体上可以分为三类：第一类是八叉树(Octree)方法，第二类是 Delaunay 方法，第三类是锋面推进(Advancing Front)法。

八叉树方法于 20 世纪 80 年代由 Mark Shephard 首创，是一种先用六面体网格剖分流场，再在六面体内部增加节点，将原有网格单元剖分为更小的单元，直到满足网格精度的方法。在二维情况下，其初始网格则为四边形网格，相应的网格划分方法则称为四叉树(Quadtree)方法。

Delaunay 方法指的是一大类方法，这些方法的共同特点是在网格剖分的过程中满足 Delaunay 准则。所谓 Delaunay 准则又叫空心球(Empty Sphere)准则，其含义是过三角形三个顶点的圆或过四面体四个顶点的球的内部不能包含其他网格单元的节点。当然这里所谓的其他网格的节点不包括与当前网格单元共用的那些节点。Delaunay 方法在具体划分网格时可以先将流场划分为粗大的网格，然后通过向初始网格内部插入新的网格节点的方式逐渐使之细化，直到网格密度满足密度函数的要求，或者网格尺度满足尺度函数的要求为止；也可以先划分边界网格，再从边界网格根据 Delaunay 准则向流场内部推进(类似于后面的锋面推进法)；还可以先根据 Delaunay 准则生成内部网格，再根据边界网格的约束条件对网格进行修正，以得到最终计算所需的网格。

锋面推进法是由美国 George Mason 大学的 Rainald Lohner 和中国香港大学的 S H Lo 发展起来的。锋面推进法在网格划分的过程中，首先要在边界上划分好三角形单元，然后再根据边界上的三角形的三个顶点计算、确定第四个顶点，最终构成新的四面体。整个网格的划分过程是从边界向流场内部推进的，推进过程中存在一个“锋面”，直到从各个边界上的锋面相遇并融合，网格划分过程才结束。在锋面推进过程中，基于原有三角形边界面得到的第四个顶点，可以是新生成的顶点，也可以是流场中原来存在的节点，究竟采用原有节点还是需要新生成一个节点，取决于对网格划分进行控制的尺度函数。在网格推进的过程中，除了要生成、确定第四顶点外，还要判断来自各个边界的锋面是否发生冲突和重叠，最后得到满足网格密度或尺度要求的网格。

无论何种网格划分方法，其网格密度通常依赖于流场的结构。在流场变量变化梯度较大的地方，比如边界层内部、激波附近区域或分离线附近，需要较大的网格密度，而在流场变量较平缓的区域则可以适当减小网格密度，以节省计算机资源。

网格在根据几何方法生成后，还必须进行光顺处理，即对畸变率较大的网格进行重新划分或调整。在实际的网格生成过程中，一方面可以通过网格的长宽比确定网格的畸变率，另一方面还可以通过控制每个网格节点夹角的方式控制畸变率。

畸变率对于计算结果的影响也与畸变网格所处的位置有关。如果畸变较大的网格处于流场变量梯度较大的区域，则由畸变带来的误差就比较大，对计算结果的影响也比较严重。如果畸变较大的网格位于流场变量变化平缓的区域，则带来的误差及其影响相对而言就比较小。因此，能否正确地划分网格在很大程度上依赖于对流场流动机理的把握和对流场结构的预判。

1.7.3 混合网格

混合网格是结构化网格与非结构化网格的组合，它继承了两种网格的优点，也弥补了两者的缺点，近期发展较快。如图1-9所示，该混合网格的具体生成方法为：在近壁面区域采用结构化网格，其他区域采用非结构化网格，Hypermesh软件的CFD网格模块就可以生成这种网格。

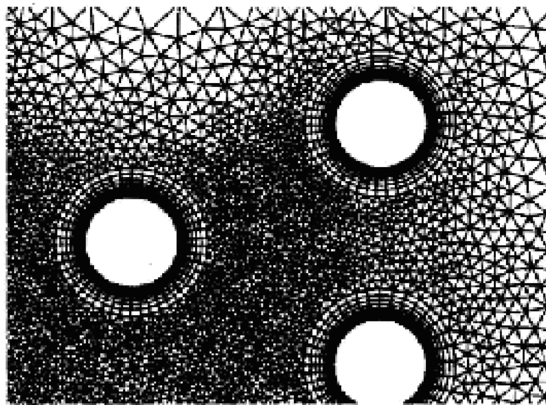


图1-9 混合网格

第 2 章　STAR-CCM + 软件介绍

2.1　软件概述

STAR-CCM + 是一款优秀的 CFD 模拟软件。它将现代软件工程技术、最先进的连续介质力学数值技术(Computational Continuum Mechanics Algorithms)和卓越的设计结合在一起。STAR-CCM + 要求求解器除进行流体分析外，也要具备结构应力/电磁场、声学等分析功能。STAR-CCM + 软件的目标是发展成为可以解析任何连续介质力学场的全新代码。

STAR-CCM + 采用连续介质力学数值技术，主要基于以下两点：

（1）多物理、基于连续介质的建模方法　建模时定义流体或固体的“连续体”(Continua)并承载网格及计算方法；求解领域(Solution Domain)划分为各个“区域”(Region)并承载物理空间。不同的区域可以设置不同的连续体，不同的物理空间可以设置不同的计算方法。

（2）物理(Physics)与网格(Mesh)的分离　在模拟设定过程中，网格仅用来定义问题的拓扑结构，求解领域内不同区域之间将进行信息传递，并且不依赖于网格，网格的选择更为自由。

STAR-CCM + 的求解思路如图 2-1 所示。软件的一体化集成环境、高重复性和适用性是其被誉为新一代 CFD 软件的最强闪光点。在 STAR-CCM + 一体化的工作环境中，可以通过一体化用户界面展示从 CAD 建模、表面网格准备、体网格生成、模型设定、计算求解一直到后处理分析的整个模拟过程。操作界面与模拟思想的良好整合使得 STAR-CCM + 非常方便

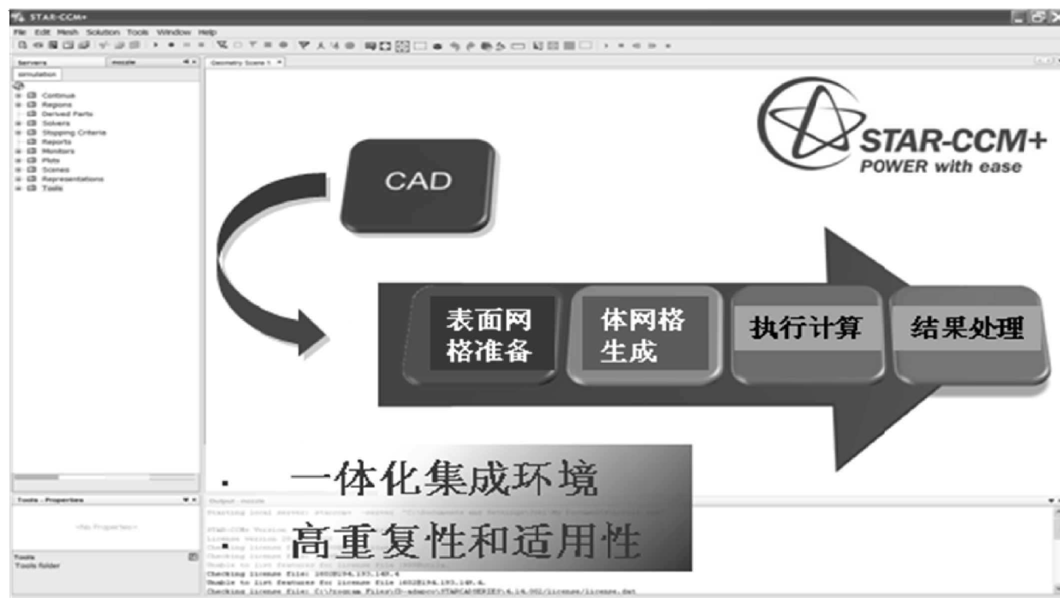


图 2-1　STAR-CCM + 的求解思路

和高效，很好地实现了用户、计算机系统和模拟三者之间的交互操作。

STAR-CCM + 采用了最新的 IT 和 CFD 技术，继承并发展了 CD-adapco 公司 20 多年来在 CAE 行业的经验与成果。与上一代 CFD 软件相比，现代软件工程技术使得 STAR-CCM + 更可靠。不同的功能模块各自独立创建，模块间不必要的关联降为最低，从而最大程度地避免预料之外的计算结果。每个软件开发周期中，进行了多次的测试与验证。STAR-CCM + 能实现 10 亿左右网格的大规模并行计算。除了在求解器方面，在前后处理方面也实现了简单易用的多 CPU 并行能力。用户只需在界面上指定机器名和 CPU 数，就可以全面实现并行处理。

为了将物理情况准确地体现在模拟中，得到良好的计算结果，STAR-CCM + 致力于以下三个关键因素：

① 稳健并准确的数值算法。

② 覆盖面宽广的物理模型。

③ 易处理的网格体系。

经验表明，用户尽可能地与求解过程进行交互操作，将大大提高工作效率，STAR-CCM + 提供的交互式工具包将用户与求解之间的交互能力提高到了一个全新的水平。图 2-2 所示为 STAR-CCM + 的树状模拟管理结构。

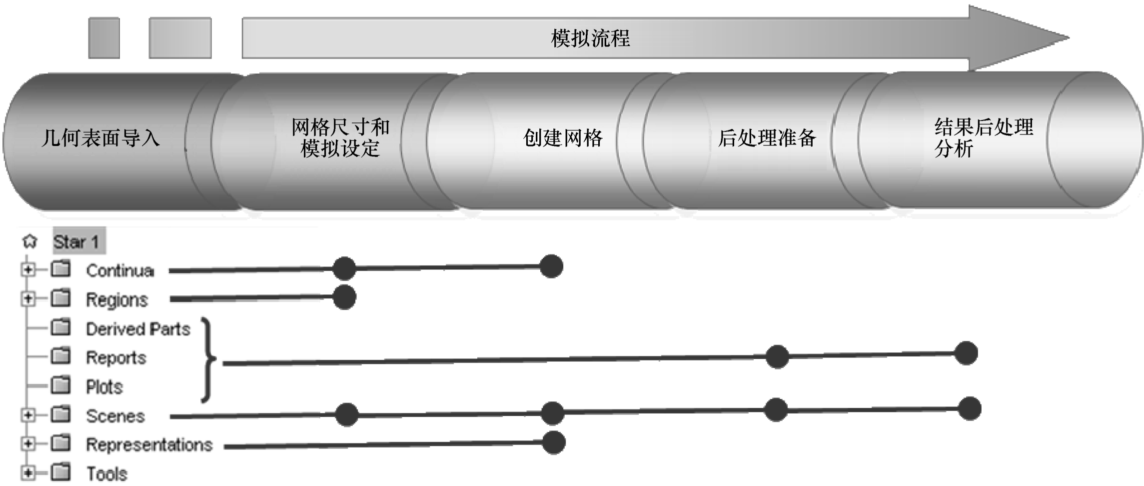


图 2-2 STAR-CCM + 的树状模拟管理结构

2.1.1 网格形式

1. STAR-CCM + 的网格方案

使用 STAR-CCM + 进行模拟，首先需要一套离散计算域空间的体网格，STAR-CCM + 既支持从外部读入各种格式的体网格文件，也可以使用 STAR-CCM + 生成。

STAR-CCM + 可以读入的面网格文件类型主要包括：

➢ STL files(*. stl)

➢ IGES files（ *. iges, *. igs）

➢ STEP files（ *. step, *. stp）

- ➢ Parasolid Transmit files（*.x_b，*.x_t）
- ➢ pro-STAR database files（*.dbs）
- ➢ pro-STAR input（cell/vertex）files（*.inp）
- ➢ STAR CCM files（*.ccm）
- ➢ pro-STAR mesh files（*.ngeom）
- ➢ NASTRAN files（*.nas）
- ➢ PATRAN files（*.pat）
- ➢ FLUENT case files（*.cas）

STAR-CCM+支持读入的体网格文件类型主要包括：

- ➢ CD-adapco CCM Files（*.ccm，*.ccmg，*.ccmp，*.ccmt）
- ➢ pro-STAR mesh files(*.ngeom)
- ➢ Fluent case files(*.cas，*.grd，*.msh)
- ➢ Plot3D input files（*.grd，*.msh，*.p3d，*.xyz）
- ➢ Gridgen input files（*.grd）
- ➢ Abaqus input files（*.inp）
- ➢ Visual Toolkit input files（*.vtk）
- ➢ Ensight input files（*.case）
- ➢ RadTherm input files（*.ntl，*.neu）

网格处理工具主要包括以下几种：

1）面网格工具，包括：包面工具(Surface wrapper)、重构工具(Surface remesher)、漏洞填充工具(Hole filler)、线条压缩工具(Edge zipper)以及特征线提取和编辑工具等。

2）体网格工具，包括：四面体网格生成器(Tetrahedral mesher)、多面体网格生成器(Polyhedral mesher)和Trimmed网格生成器(Trimmed mesher)。

3）边界层网格工具：Prism layer mesher。

4）精细网格调节工具：Volumetric Controls(局部参数设置,可用于设置局部加密区)。

5）网格变换工具：Transform(平移)、Rotate(旋转)、Scale(缩放)和Reflect(映射)。

6）其他，如对边界(Boundaries)和区域(Regions)的分裂(Split)和合并(Combine)，以及创建、删除和融合交界面(Interfaces)等。

2. STAR-CCM+的网格形式

STAR-CCM+具有功能强大的网格生成器，可自动划分多面体网格、四面体网格、Trimmed网格。

多面体网格(Polyhedral Mesh)如图2-3所示。

四面体网格(Tetrahedral Mesh)如图2-4所示。

Trimmed网格(Hexahedral:6面体核心)如图2-5所示。

Trimmed网格(Dodecahedral:12面体核心)如图2-6所示。

边界层网格(Prism Mesher)如图2-7所示(位于管体边缘)。拉伸层网格(Extruder Mesher)如图2-8所示(位于左侧)。

薄壁层网格(Thin Mesher)如图2-9所示。薄壁层网格用于薄板或薄面的网格划分。

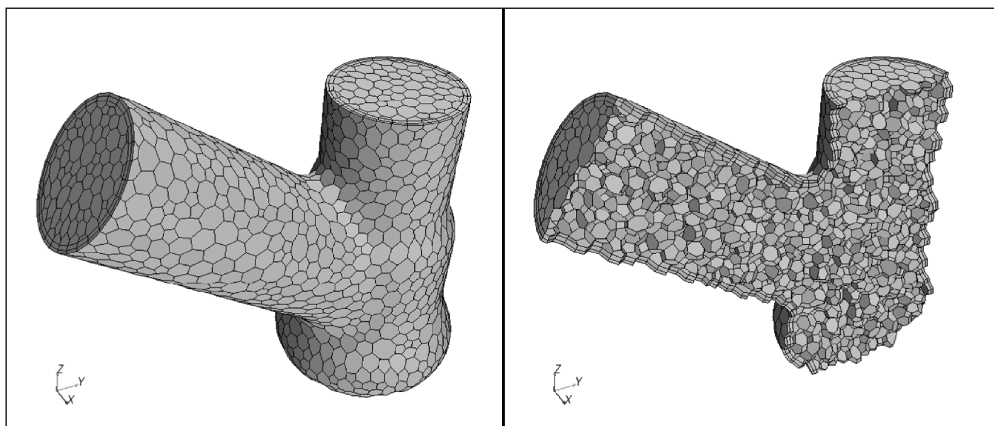


图 2-3　多面体网格(Polyhedral Mesh)

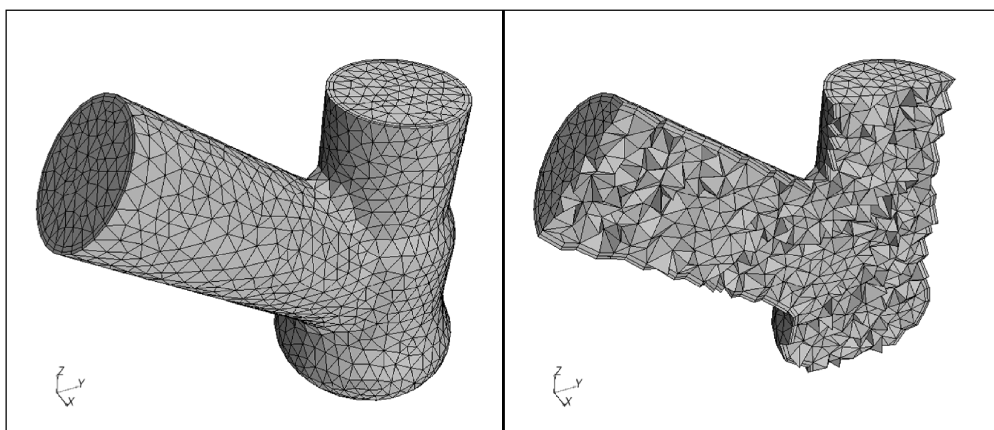


图 2-4　四面体网格(Tetrahedral Mesh)

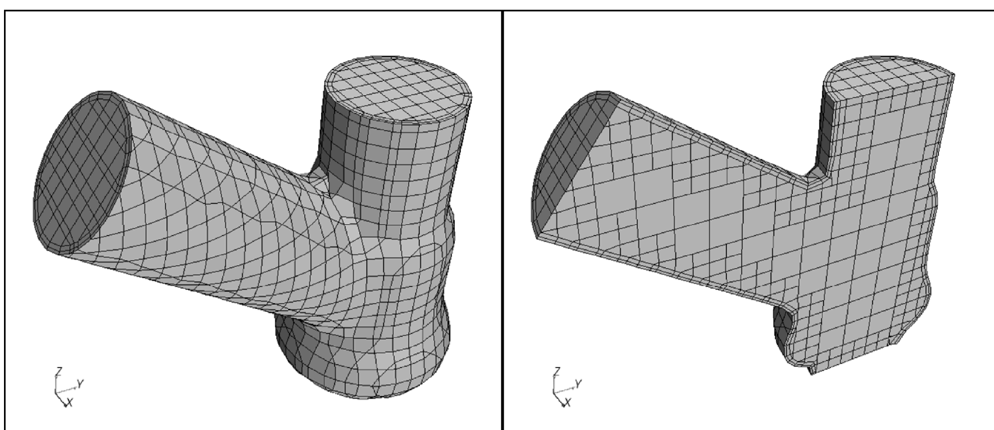


图 2-5　Trimmed 网格(Hexahedral:6 面体核心)

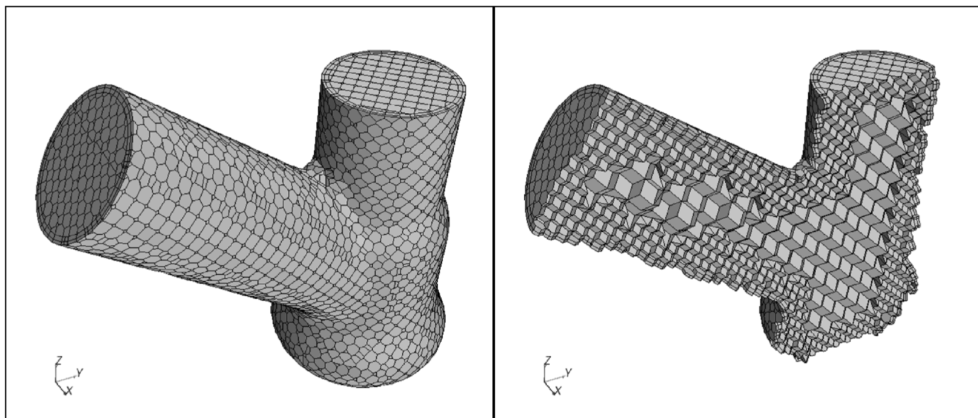


图 2-6　Trimmed 网格(Dodecahedral:12 面体核心)

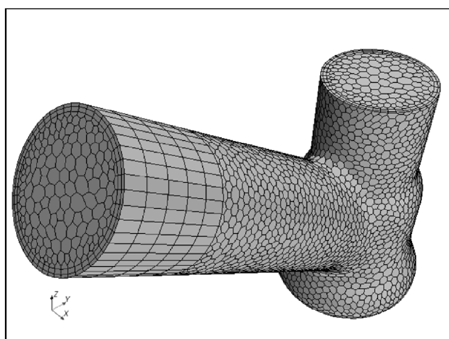


图 2-7　边界层网格

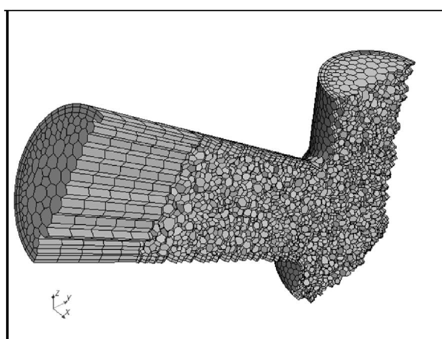


图 2-8　拉伸层网格

（1）四面体网格　四面体是一种比较简便的自动划分方式。每个四面体有四个相邻单元，对于单元中心的数值是采用线性的近似。但是，当相邻节点的空间位置接近于一个平面时，垂直于这个面的梯度就难以计算准确；当一个单元的面位于边界上时，它的相邻三个单元计算可能出现计算不准，在计算区域的边和角的位置，四面体的问题更突出。

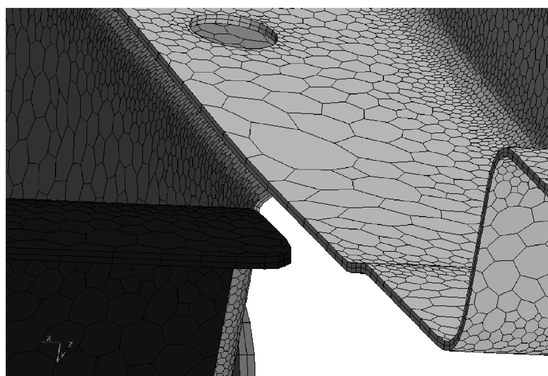


图 2-9　薄壁层网格

（2）多面体网格　多面体网格源自于“蜂窝猜想”这一数学问题：六边形拓扑网格可以利用最少的周长划分相同面积。多面体网格的优点如图 2-10 所示。

多面体网格克服了传统网格的缺点：

1）有更多的相邻单元，梯度的计算和当地的流动状况预测更准确。

2）多面体对几何的变形没有四面体敏感。智能的网格工具使得单元可以自动融合、分

裂，或者增加新的点、线、面。

3）对于存在回流的流动，多面体的计算精度甚至超出 Hexa 网格。

STAR-CCM + 可以接受目前流行网格生成软件的网格（Hexa、Tetra 等），也可以求解多面体网格（Poly）。多面体网格和相同数量的四面体网格（Tetra）相比，不但计算结果更精确，而且求解速度快 3 ~5 倍。

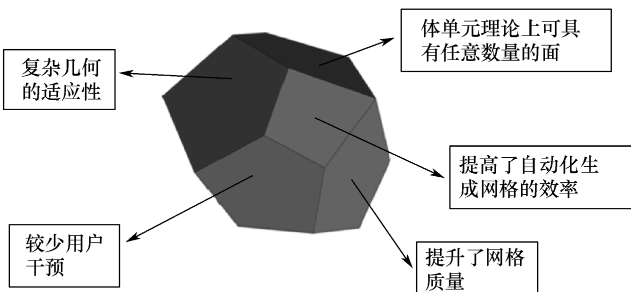


图 2-10 多面体网格的优点

多面体模型对网格数量的依赖性比四面体小，只需四面体网格数的 1/4 即可保证计算精度，同时收敛速度、趋势更好于四面体网格。

（3）Trimmed 网格　Trimmed 网格的划分原理如图 2-11 所示，以带边界层的圆柱体网格划分为例，Trimmed 网格的划分可用以下四步来概括：

1）首先将圆柱体用一条内边框（边界层边界）作为区分边界层（Prism layer mesh）与中心网格（Core mesh）的边界，边界层边界与真实边界（圆柱体边界）的距离为所设边界层的厚度。

2）用圆柱体去切割六面体网格的长方体（虚拟的长方体，将圆柱体包含在内）。

3）圆柱体中边界层边界内的网格留下，中心为六面体网格（Core mesh），边界层边界附近留下的为不规则网格（可能为四面体）。

4）边界层内生成网格（如果几何表面较为复杂，边界层网格不一定为六面体网格）。将两部分网格组合和光顺后，即成为图 2-11 所示的网格。

由此可见，Trimmed 网格又称为切割体网格。

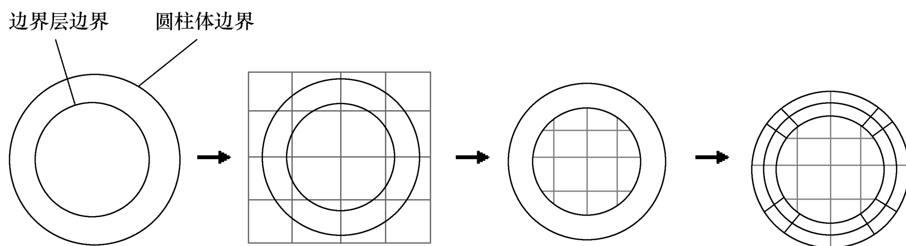


图 2-11 Trimmed 网格的划分原理

Trimmed 网格保证了大部分区域为计算性能较好的六面体网格，也就保证了计算的精度。

2.1.2 STAR-CCM + 常用的四个术语

利用 STAR-CCM + 进行网格划分和求解时，常使用 Region（区域）、Boundary（边界）、Interface（交界面）、Continua（连续体）这四个术语。

各术语的意义使用图 2-12 的模型来解释。

1. Region（区域）

如图2-13 所示，Region 代表模拟区域内的空间，各 Region 通常由 Boundary（边界）区分开。

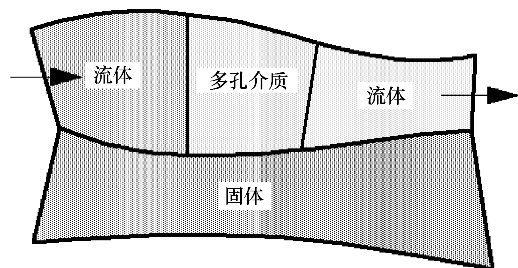


图 2-12　各物体模型

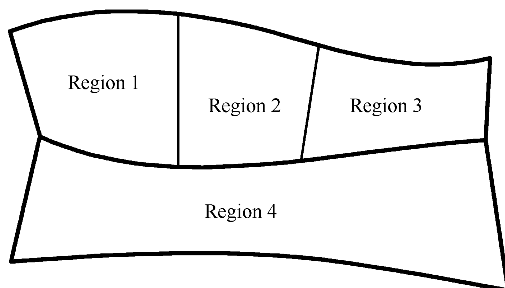


图 2-13　Region(区域)

2. Boundary(边界)

如图 2-14 所示，Boundary 存在于 Region 的表面，Boundary 上能够指定边界条件。以下模型中，Interface Boundary 为区域交界面，Wall 为其他壁面。

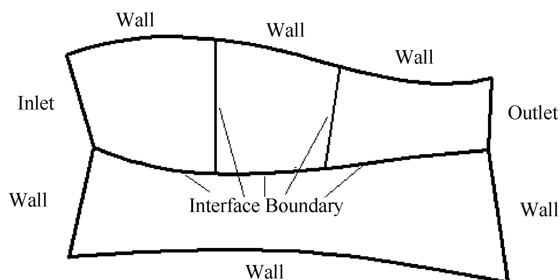


图 2-14　Boundary(边界)

3. Interface(交界面)

如图 2-15 所示，Interface 是为了结合不同的 Region 而使用的。Interface 的设定，可以使质量及能量在不同的 Region 和 Continua 间传递。Interface 是以 Boundary 为基础的。例如，Contact Interface 是由流体/固体间的边界生成的接触交界面。

4. Continua(连续体)

如图 2-16 所示，Continua 是气体、液体或固体各自代表的区域。以下模型中，流体和多孔介质属于同样的 Fluid Continuum。

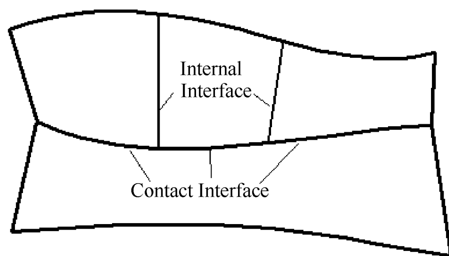


图 2-15　Interface(交界面)

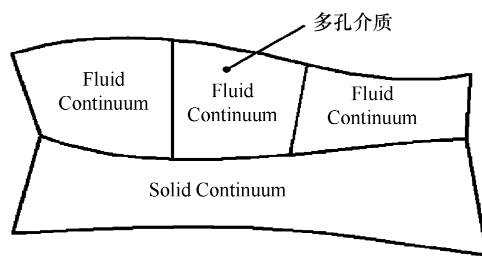


图 2-16　Continua(连续体)

2.2　软件安装流程

本节以适用于 Windows XP x86 _ 32 操作系统的 STAR-CCM + 5.02 软件版本为例进行软件安装流程的介绍，其余版本与别的操作系统的安装方法与此类似。

2.2.1　安装指南

[适用版本]

Windows XP x86 _ 32

[安装流程]

在本安装指南中，所需的应用程序将被安装到如下地址：

Star-CCM + C:\Program Files\CD-adapco

JavaSDK C:\Program Files\Java\jdk1. 6. 0 _ 07

FLEXlm C:\Program Files\CD-adapco\FLEXlm\11. 7

MPICH2 的相关文件包含在 STAR-CCM + 中。

STAR-CCM + 及其组件的安装如下：

1）将安装文件从光盘中复制到本地目录，解压缩。

2）以 5. 02. 009 版本的 STAR-CCM + 为例，运行安装目录下的 STAR-CCM + _ Cad-Series5. 02. 009 _ win32 _ intel11. 1. exe 文件，如图 2-17 所示。

名称	大小	类型
images		文件夹
InstallationGuide_5.02.009_01.html	162 KB	HTML 文档
PACKAGE_VERSION	1 KB	文件
ReleaseNotes_5.02.009_01.html	159 KB	HTML 文档
STAR-CCM+_CadSeries5.02.009_win32_intel11.1.exe	599,863 KB	应用程序

图 2-17 安装文件

3）选择安装过程语言提示，保持默认语言(English)不变，点击[OK]，如图 2-18 所示。



图 2-18 保持默认语言

4）出现起始安装提示界面，点击[Next >]，如图 2-19 所示。

5）出现许可协议界面，选择 I accept the agreement，点击[Next >]，如图 2-20 所示。

6）指定安装目录，在此保持默认目录不变，点击[Next >]，如图 2-21 所示。

7）选择要安装的组件，在这里，请追加选择 STAR-View +、Java SDK6u7、FLEXlm 11. 7 Utilities，点击[Next >]，如图 2-22 所示。

8）图 2-23 所示是 License 服务器信息界面，[Host]为 License 所在机器名，[Port]为 License 对应端口号(默认为 1999)，点击 Add 即完成 License 服务器信息的添加。点击[Next >]，继续后续步骤。

9）设定开始菜单所在目录，在这里使用默认的文件夹名，点击[Next >]，如图 2-24 所示。

10）选择追加的内容，在此勾选全部四个内容，点击[Next >]，如图 2-25 所示。

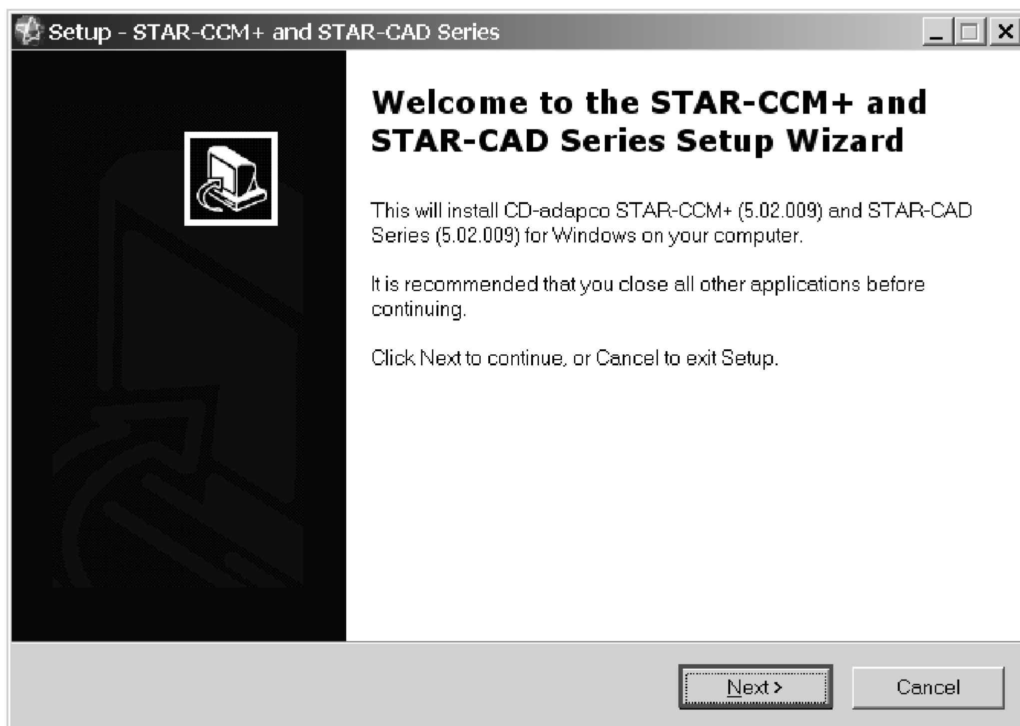


图 2-19　安装提示界面

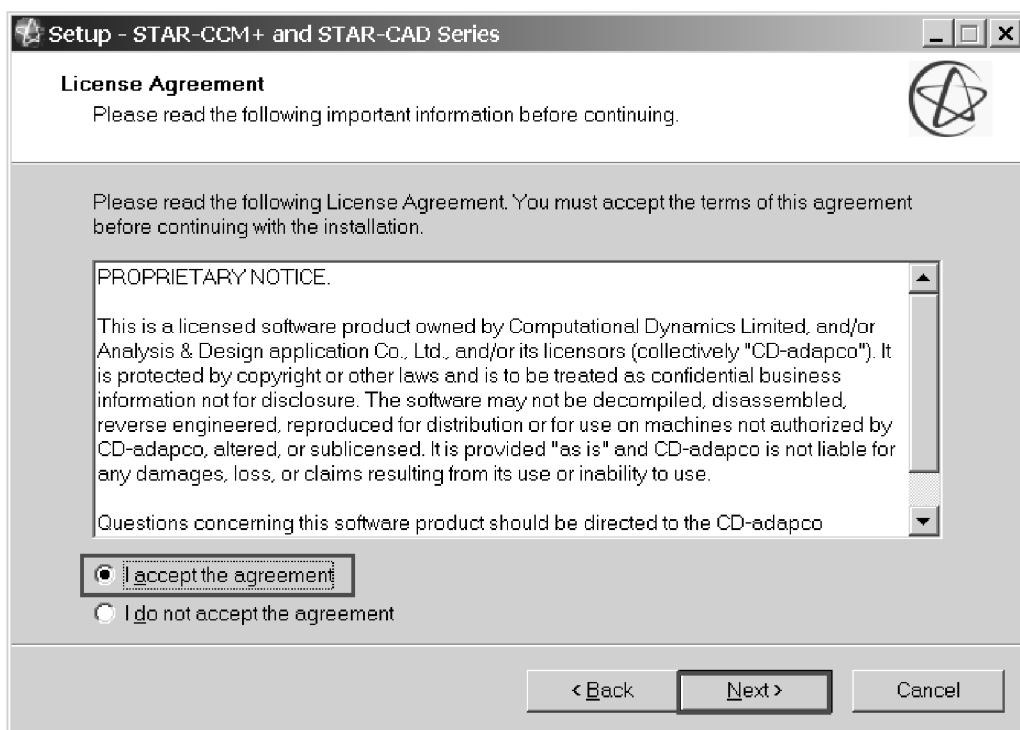


图 2-20　选择 I accept the agreement

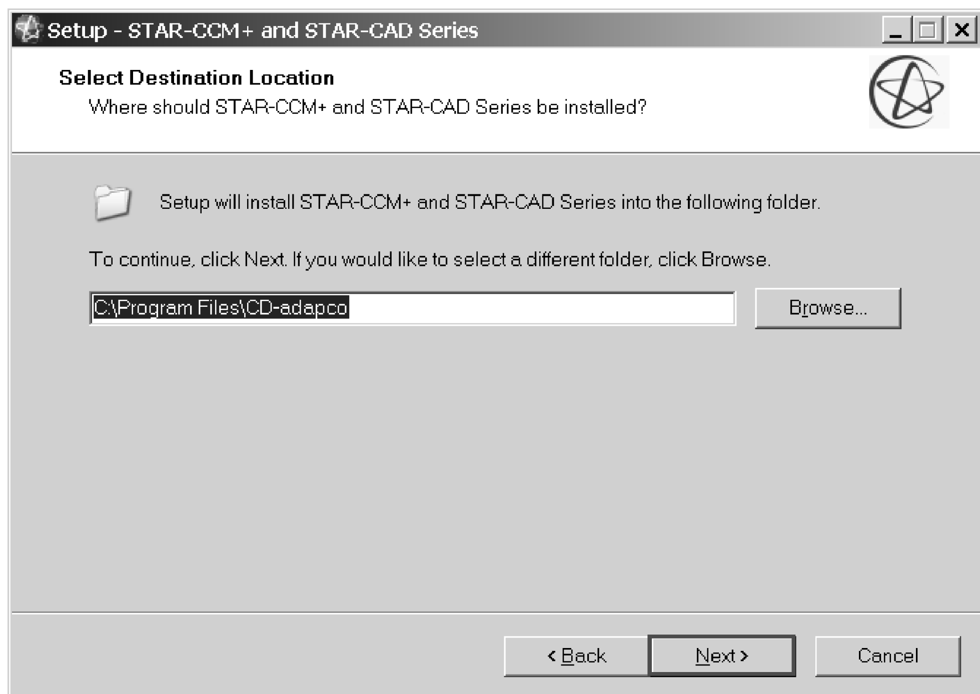


图 2-21　保持默认目录不变

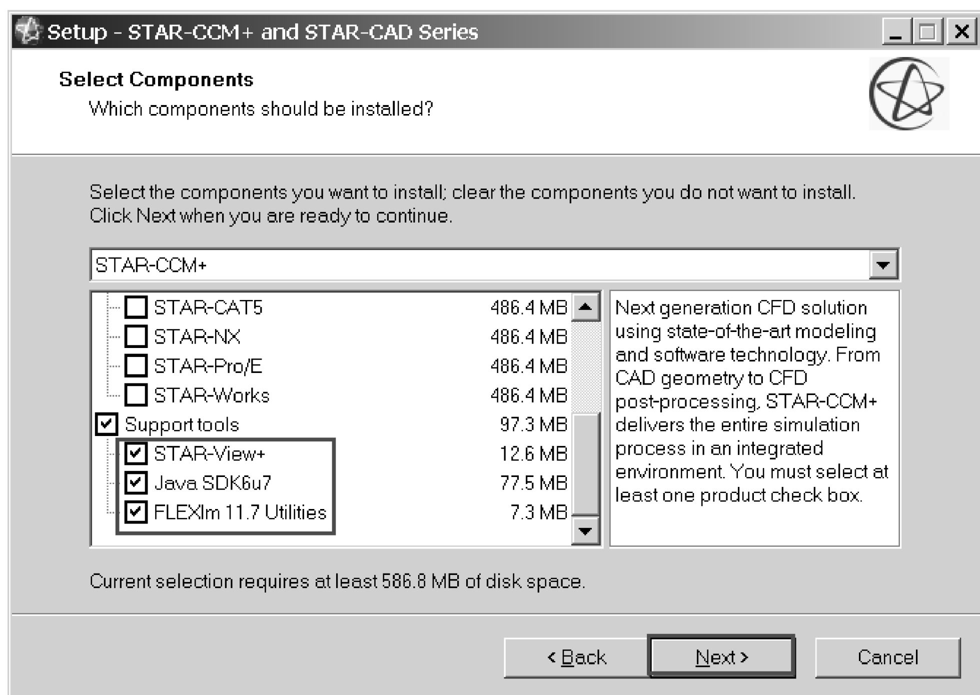


图 2-22　追加选择 STAR-View + 、Java SDK6u7 、FLEXlm 11. 7 Utilities

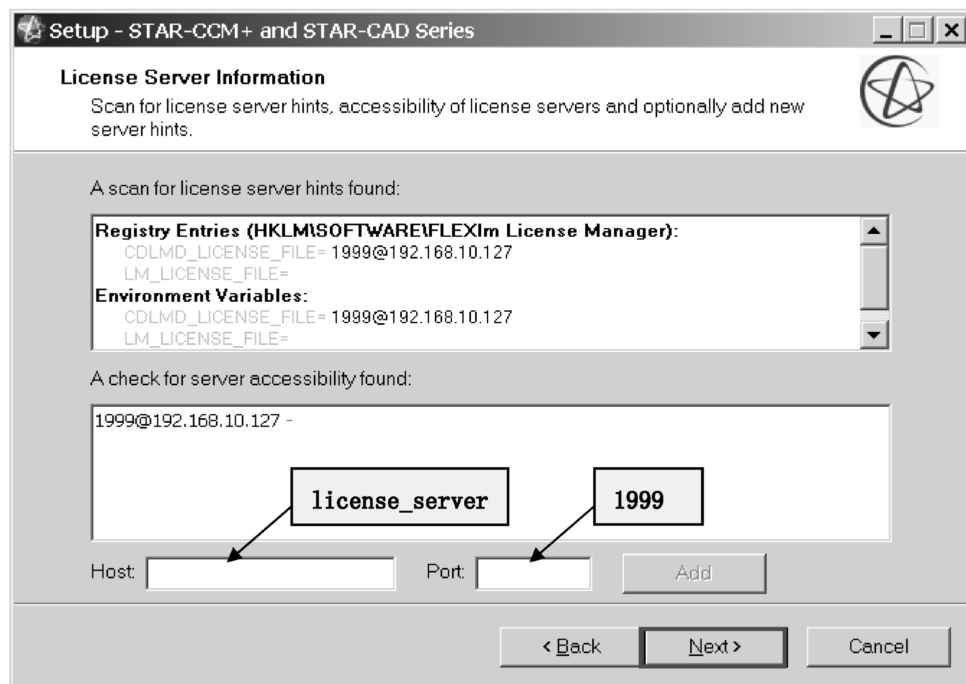


图 2-23　添加 License 服务器信息

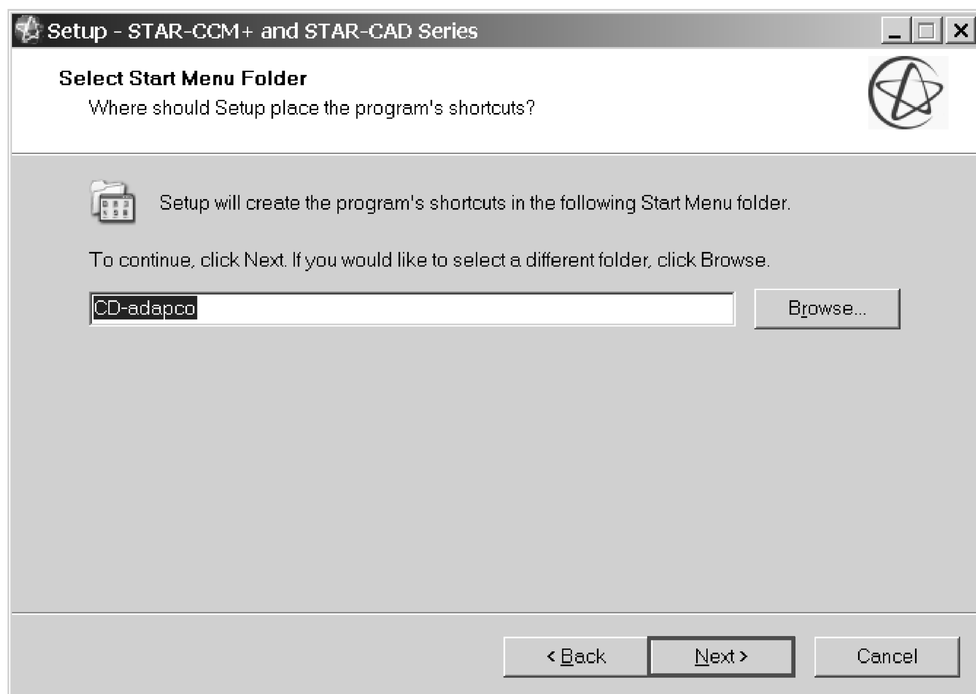


图 2-24　使用默认的文件夹名

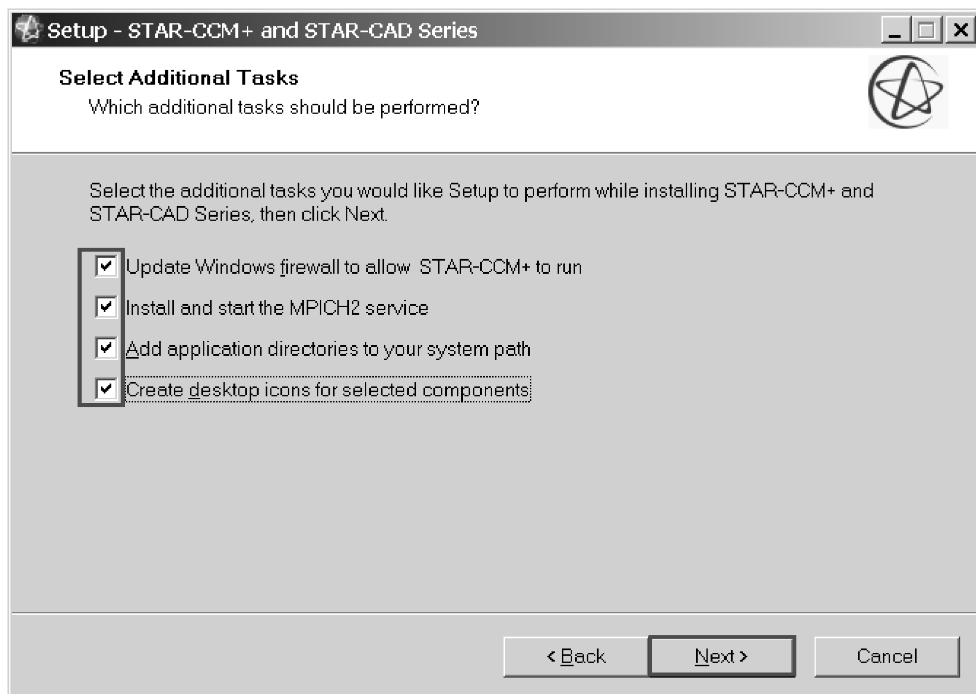


图 2-25 勾选全部内容

11）点击[Install]，开始进入安装过程，如图 2-26 所示。

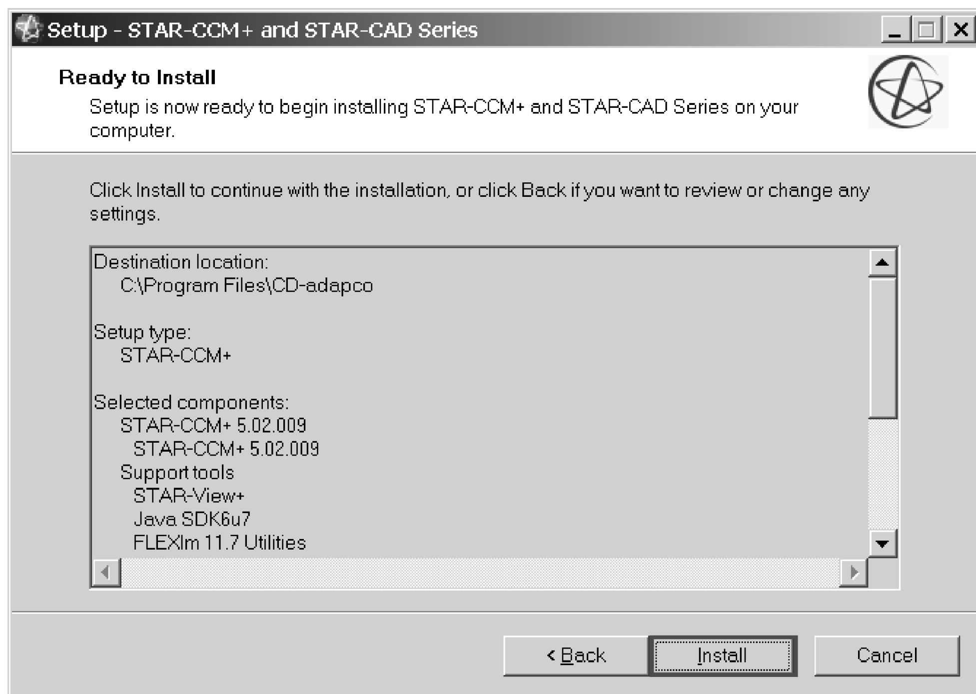


图 2-26 进入安装过程

12）安装过程中，Java 的安装开始后，会出现许可证协议界面，点击[接受(A) >]，如图 2-27 所示。

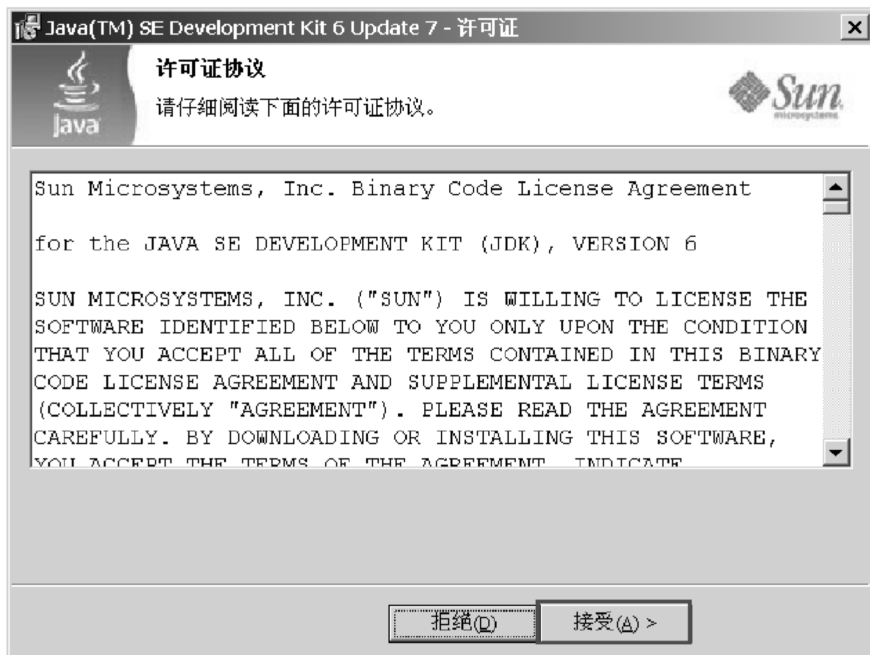


图 2-27　接受许可证协议

13）定义安装目录，在此使用默认的安装目录(C:\Program Files\Java\jdk1.6.0_07)，点击[下一步(N) >]，继续安装，如图 2-28 所示。

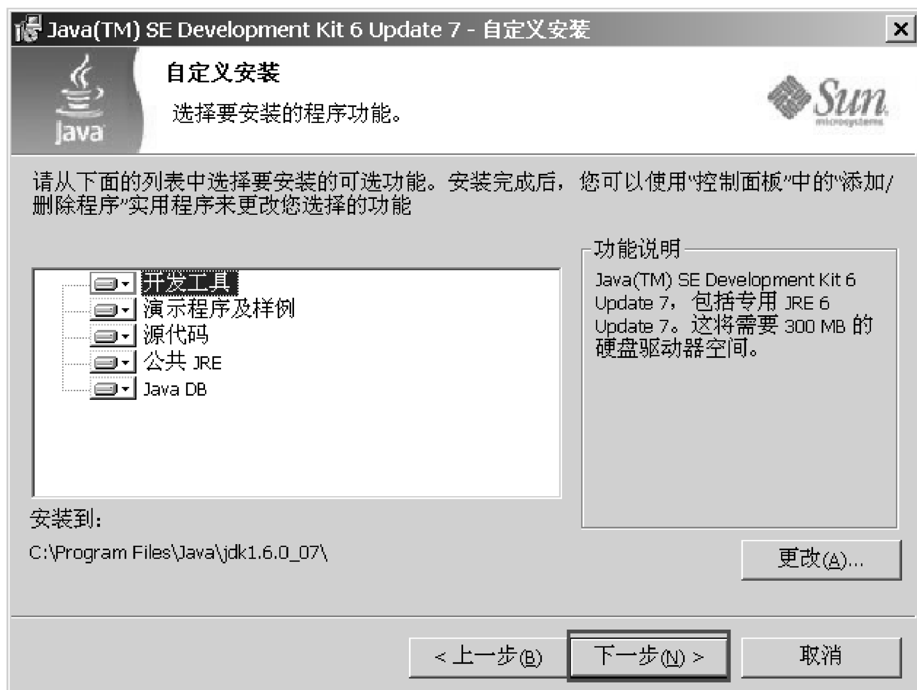


图 2-28　使用默认的安装目录

14）指定 Java Runtime Environment6（jre6）的安装目录，在此使用默认的安装目录（C:\Program Files\Java\jre1.6.0_07），点击[下一步(N)>]，继续安装，如图 2-29 所示。



图 2-29 指定 Java Runtime Environment6（jre6）的安装目录

15）成功安装后，出现图 2-30 所示界面。点击[完成(F)]，结束 Java 安装。



图 2-30 结束 Java 安装

16）点击[Finish]完成全部安装过程，如图 2-31 所示。

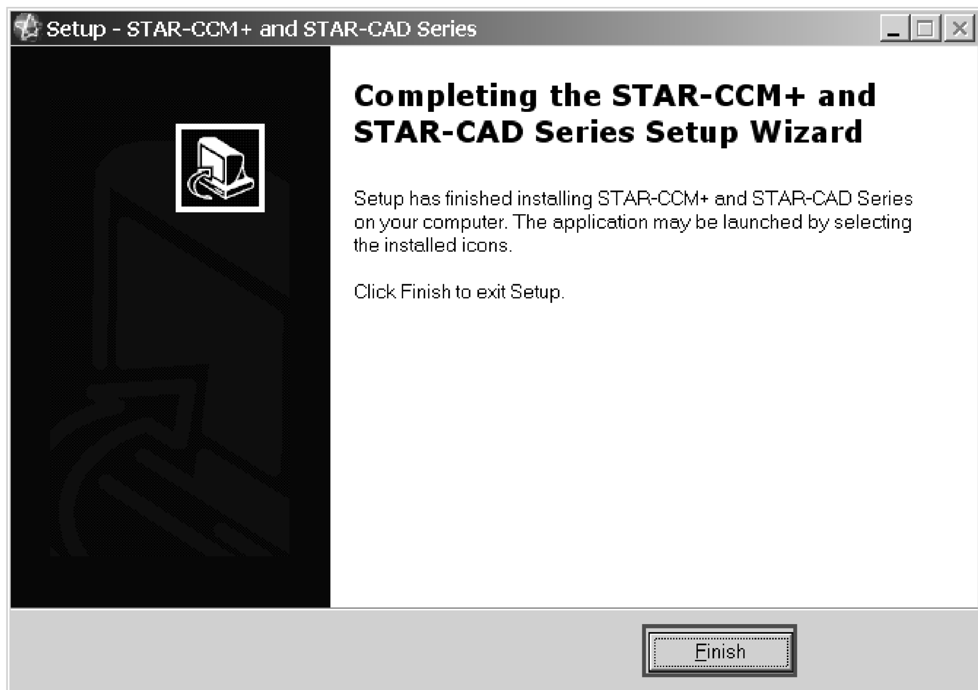


图 2-31　完成全部安装过程

2.2.2　启动 License

1. 使用 license 管理器

1）复制 license 文件(license. dat)到指定目录(如:C:\Program Files\CD-adapco\license)。

2）进入 License 服务器的安装目录(默认路径为 C:\Program Files\CD-adapco\FLEXlm\11. 7\bin)，双击 lmtools. exe。

3）在 LMTOOLS 面板的[Service/License File]标签卡中，选择“Configuration using Services”，如图 2-32 所示。

4）在 LMTOOLS 面板的[Configure Services]标签卡中，配置 license 服务器，如图 2-33 所示。

按照以下顺序配置：

[**Service Name**]：

定义 license 服务器的名字(如:CD-adapco License Manager)。

[**Path to the lmgrd. exe file**]：

指定 license 服务器的路径(即 C:\Program Files\CD-adapco\FLEXlm\11. 7\bin\lmgrd. exe)。

[**Path to the license file**]：

指定 license 的路径(如:C:\Program Files\CD-adapco\license\license. dat)。

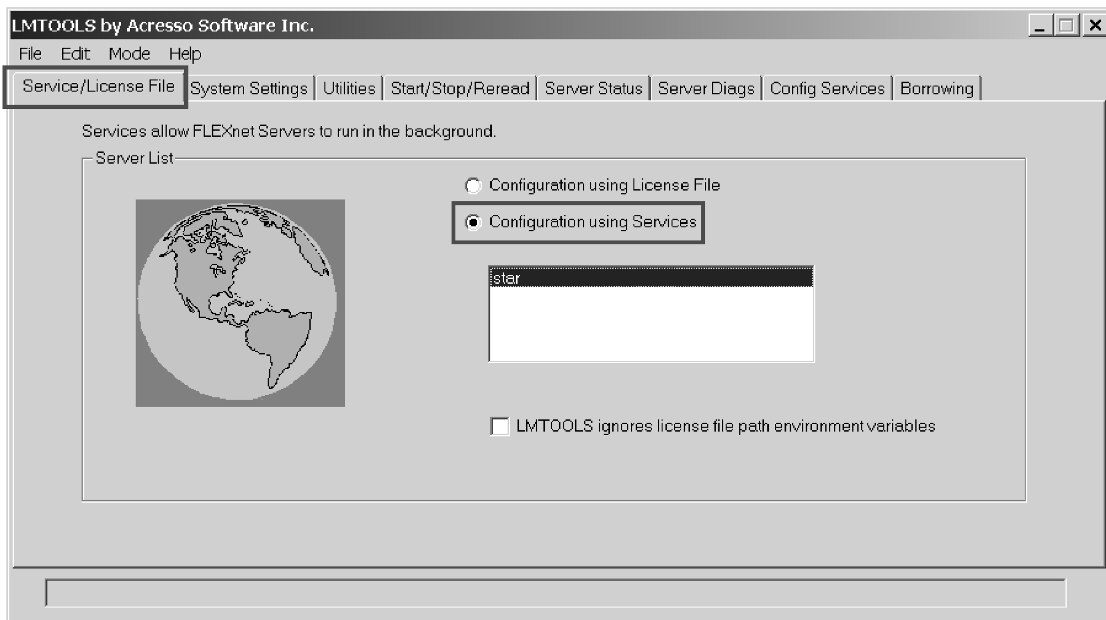


图 2-32　选择 Configuration using Services

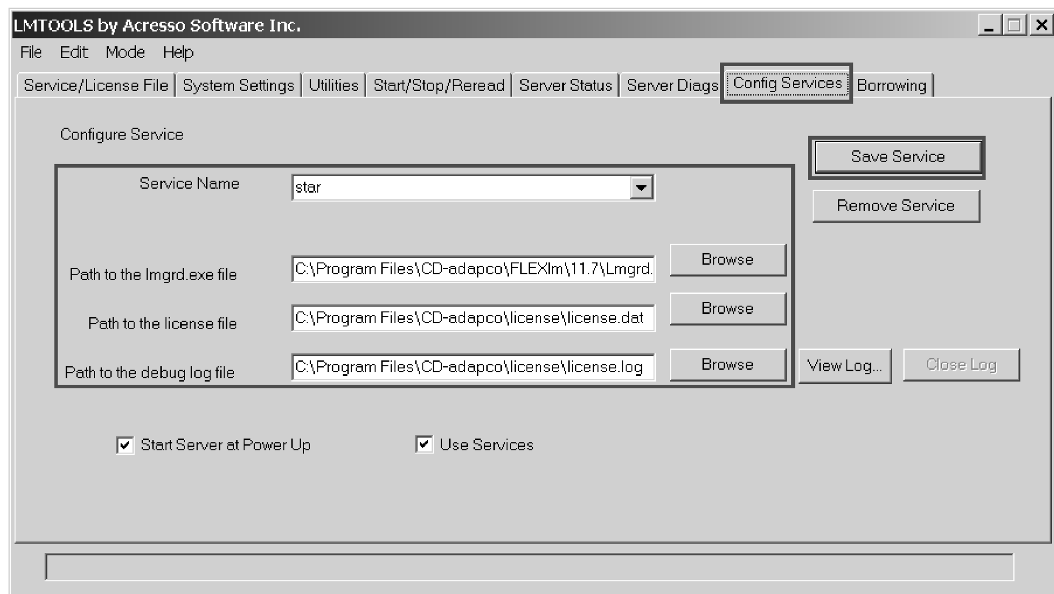


图 2-33　配置 license 服务器

[**Path to the debug log file**]：

license 日志文件的路径(如:C:\Program Files\CD-adapco\license\license. log)。

[**Star Server at Power Up**]：

勾选，设置在 Windows 启动时 LicenseServer 自动启动。

[**Use services**]：

勾选。

最后，点击 Save service 按钮保存设置。

5）在 LMTOOLS 面板的[Start/Stop/Reread]标签卡中，点击“Start Server”按钮，启动 license 服务器，如图 2-34 所示。

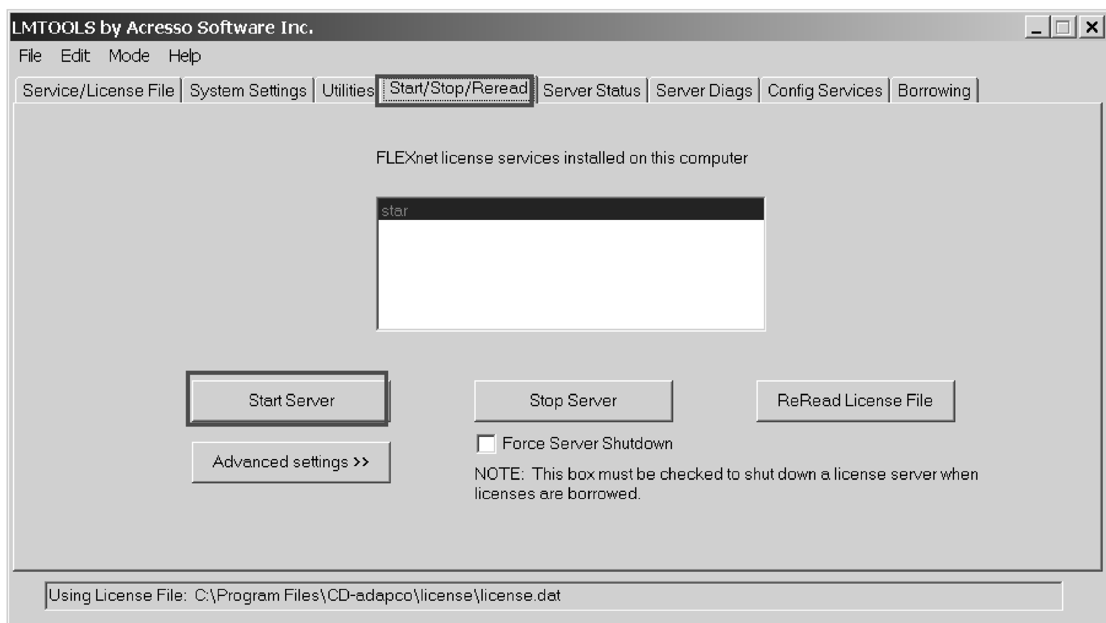


图 2-34　启动 license 服务器

2. 设定环境变量

1）右键点击[我的电脑]，选择[属性(R)]，如图 2-35 所示。

2）打开[高级]标签，点击“环境变量(N)”按钮，如图 2-36 所示。

3）在“系统变量(S)”下，点击“新建(W)”按钮，如图 2-37 所示。

4）如图 2-38 所示，在新建用户变量面板下，定义所需变量，其中：

变量名：CDLMD _ LICENSE _ FILE

变量值：1999@ < licenseServer 名 >



图 2-35　选择[我的电脑]的属性

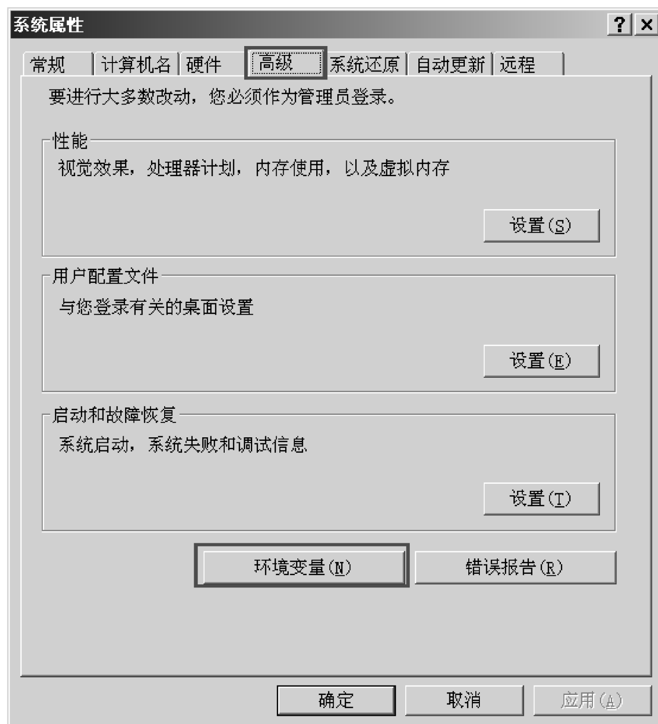


图 2-36 点击“环境变量(N)”



图 2-37 新建系统变量



图 2-38　新建用户变量面板

2.3　软件界面介绍

在 Unix/Linux/Windows 各操作系统下，STAR-CCM + 所用的启动方式不同，以 Windows 操作系统为例，双击桌面上的 STAR-CCM + 图标，会出现启动界面，如图 2-39 所示。几秒后，STAR-CCM + 启动完成，进入软件界面，如图 2-40 所示。

STAR-CCM + 软件界面包括标题区、菜单区、常用工具区、树形菜单控制区、图形显示区、属性值区、log 文本输出区(又称输出窗口)。



图 2-39　STAR-CCM + 启动界面

2.3.1　菜单

STAR-CCM + 软件共有 File、Edit、Mesh、Solution、Tools、Windows 和 Help 七个菜单项，分别如图 2-41 ~ 图 2-47 所示。

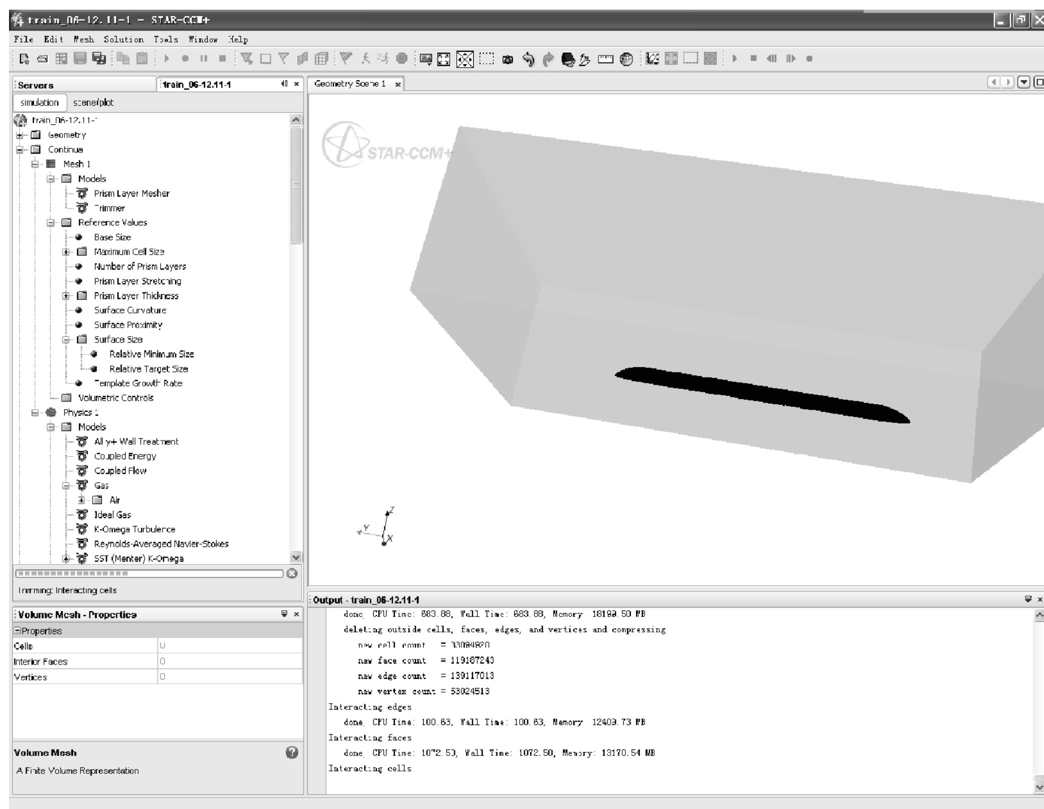


图 2-40 STAR-CCM + 用户界面

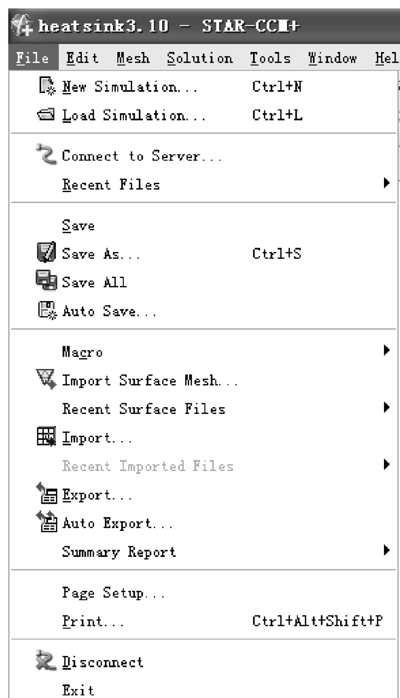


图 2-41 File 菜单

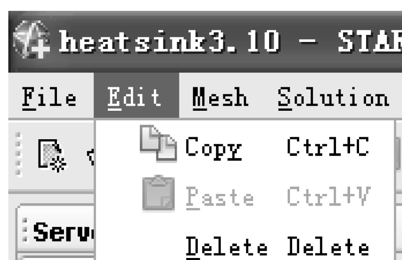


图 2-42 Edit 菜单

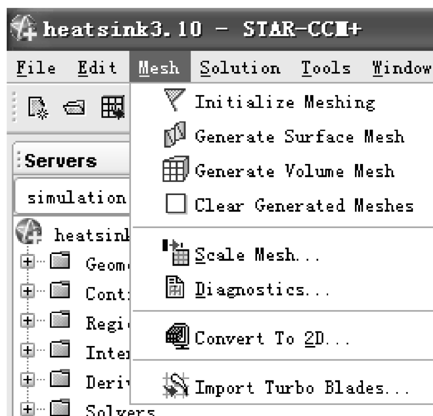


图 2-43　Mesh 菜单

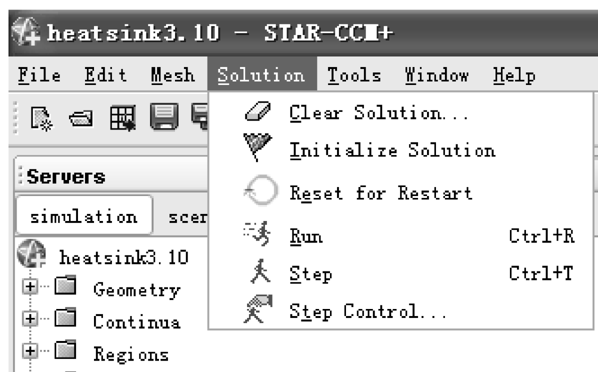


图 2-44　Solution 菜单

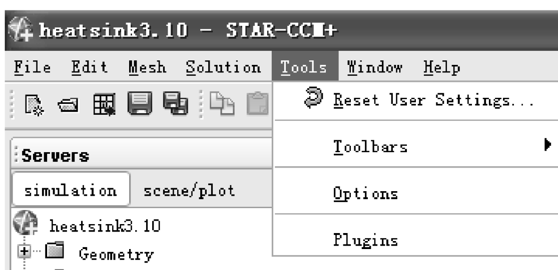


图 2-45　Tools 菜单

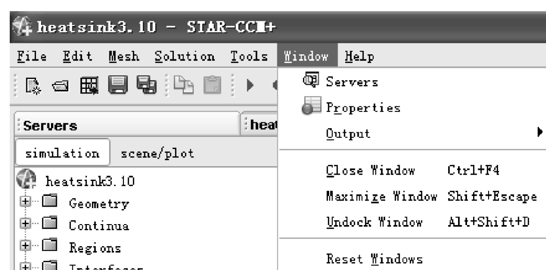


图 2-46　Window 菜单

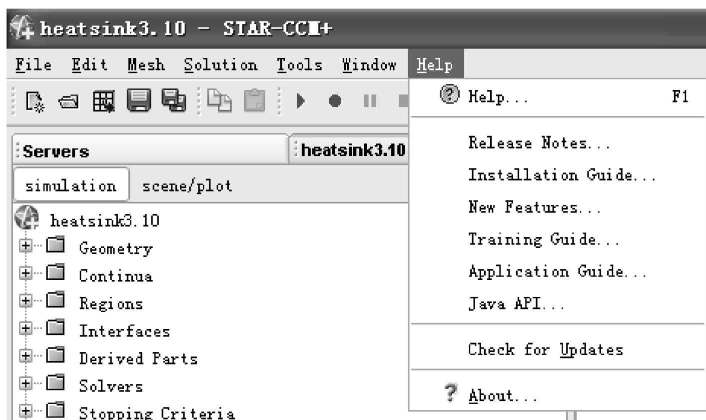


图 2-47　Help 菜单

STAR-CCM+的用户界面非常友好，操作简单。

通过 File 菜单可以创建新的模拟或打开已有的设定存储“.sim”文件，导出(Export)或导入(Import)体网格、计算结果、动画等。

通过 Edit 菜单可以进行复制、粘贴、删除等操作。

通过 Mesh 菜单可以实现网格划分初始化、面网格生成、体网格生成、网格缩放、检查网格质量(Diagnostics)等功能的操作。Mesh 菜单中还含有专用于叶轮机械内部流场分析的模块“Import Turbo Blades...”。

通过 Solution 菜单可以实现计算条件初始化、开始计算、停止计算等功能，并可以清除历史计算记录(Clear Solution)。

通过 Tools 菜单可以选择、取消和定制软件界面上显示的工具，包括工具栏工具。点击

菜单[Tools]>[Toolbars]>[Customize…]，弹出“Customize Toolbars”对话框，可以看到列表框中存在“Thermal Comfort Wizard”工具，即热舒适性管理模块(TCM 模块)，如图 2-48 所示。该模块可以直接点击启动，也可以将其拖动到工具栏中。

如果选择[Tools]>[Reset User Settings...]选项，可以将软件恢复到默认设置。

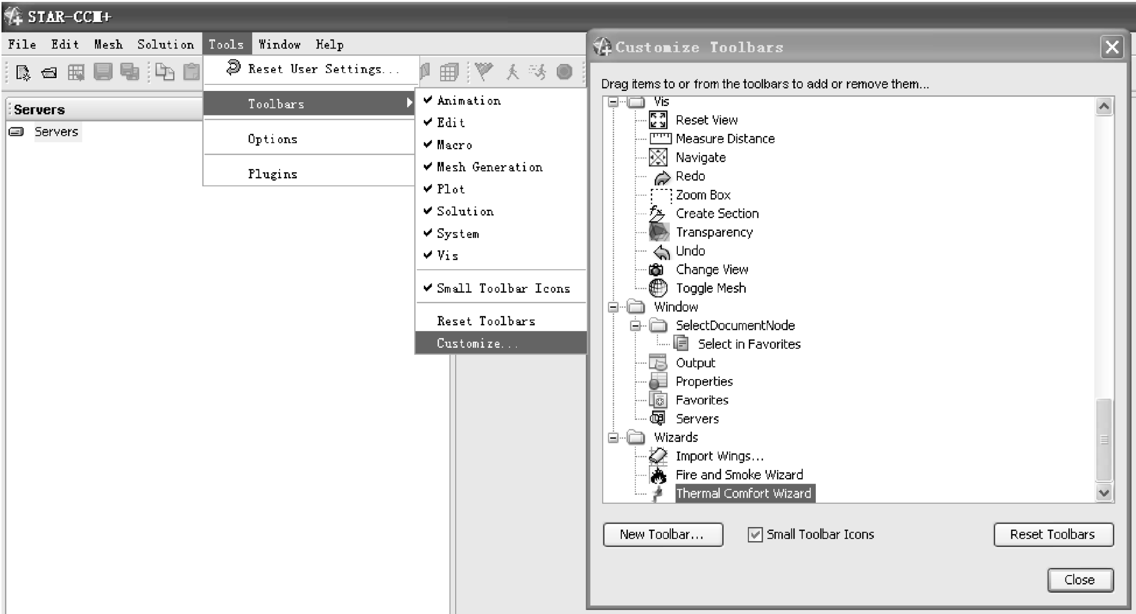


图 2-48 启动 TCM 模块

通过 Window 菜单可以控制和调整视图区的显示方式。

通过 Help 菜单可以查询帮助文件和检索疑难问题。

2.3.2 工具栏

STAR-CCM+工具栏如图 2-49 所示。



图 2-49 STAR-CCM+工具栏

工具栏上的 40 个按钮对应的命令、操作、图标等信息按从左到右的顺序，列于表 2-1 中。

表 2-1 工具栏上的按钮对应的命令、操作、图标等信息

命　令	对应操作	按钮图标	快捷键
Create a new simulation	创建新的计算		“Ctrl” + “N”
Load simulation...	打开已有的计算		“Ctrl” + “L”
Import...	导入		

（续）

命　　令	对 应 操 作	按 钮 图 标	快　捷　键
Save	保存		
Save All	保存全部		“Ctrl” + “S”
Copy	复制		“Ctrl” + “C”
Paste	粘贴		“Ctrl” + “V”
Play Macro...	运行宏		
Start Recording...	开始记录宏		
Pause Recording	暂停宏		
Stop Recording	停止宏		
Import Surface Mesh	导入表面网格		
Clear Generated Meshes	清除生成的网格		
Initialize Meshing	初始化网格设置		
Generate Surface Mesh	生成表面网格		
Generate Volume Mesh	生成体网格		
Initialize Solution	求解初始化		
Step	单步计算		“Ctrl” + “T”
Run	开始计算		“Ctrl” + “R”
Stop Iterating	停止计算		
Create/Open Scenes	创建/打开视图		
Reset View	重建视图		
Navigate	导航		
Rubberband Zoom	放大局部视图		
Save-Restore-Select views	保存/设定/选择视图		
Undo View	撤销视图		
Redo View	重设视图		
Make Scene Transparent	透明化视图		
Create Plane Section	创建截面		

（续）

命　　令	对 应 操 作	按 钮 图 标	快　捷　键
Measure Distance	测量距离		
Turn mesh on or off	开启/关闭网格		
Create/Open Plot	创建/打开图表		
Fit Plot View	绘制匹配视图		
Toggle plot zoom	框选绘图区域		
Toggle plot pan	框选绘图面板		
Play/pause animation in active scene	开始/暂停动画		
Stop animation in active scene	停止动画		
Single-step animation backwards in active scene	后退一帧动画		
Single-step animation forward in active scene	前进一帧动画		
Write a movie of the animation in the current scene	将动画存为视频文件		

2.3.3 树形菜单

STAR-CCM+软件采用的树形菜单，使操作更简易化。树形菜单包含了几何形状的处理（[Geometry]）、网格模型的选择及参数设定（[Continua]>[Mesh]）、物理模型的选择（[Continua]>[Physics]）、区域边界条件设置及计算条件的设定（[Regions]）、计算结果报告输出（[Reports]）、视图区输出图片与曲线的选择（[Monitors]、[Plots]和[Scenes]）等子项，如图2-50所示。通过树形菜单下的属性栏对话框设定数据，清晰明了，操作方便。

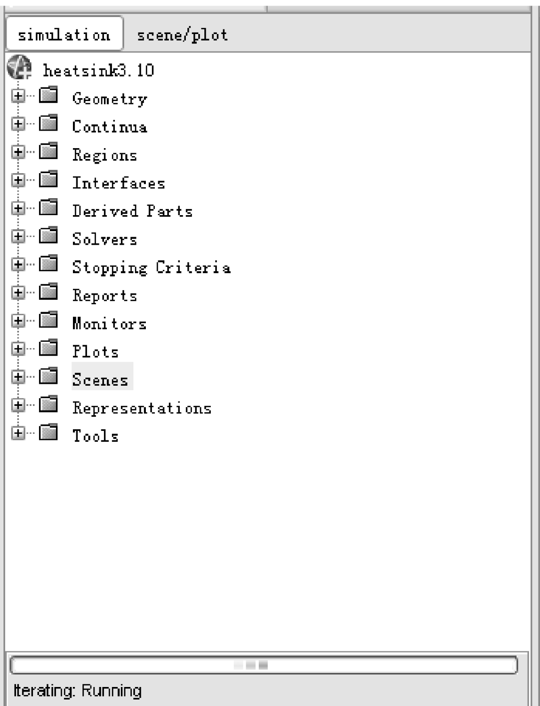


图2-50　树形菜单

2.3.4 视图区

视图区主要输出几何结构形式、计算结果图表与截面温度、压力、速度云图等。

视图区视图角度的变换可通过工具实现，主要包括投影模式（Projection Mode）、组合视图（Look Down）、标准视图

(Standard Views)三大类视图角度调整方式，如图 2-51 所示。工具一直处于激活状态，在运行计算时也可进行视图调整。

Standard Views 包括 + X、 − X、 + Y、 − Y、 + Z、 − Z 六种视图方式，如图 2-52 所示。

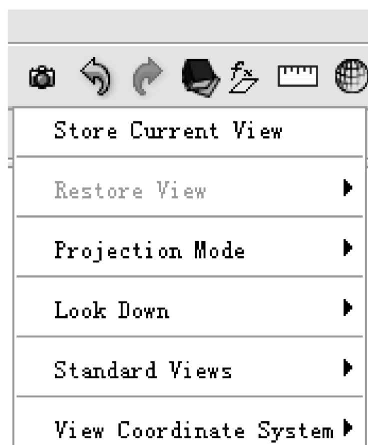


图 2-51　工具

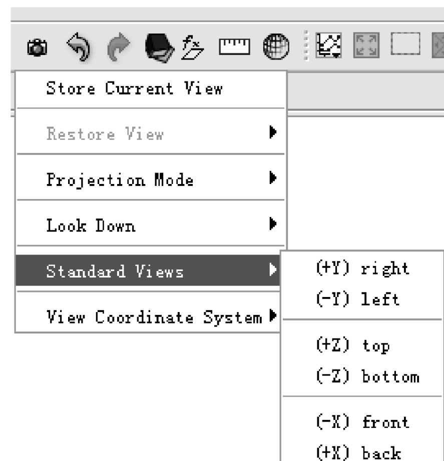


图 2-52　Standard Views(标准视图)

Projection Mode 包括 Perspective(透视显示效果)和 Parallel(平行显示效果)两种方式，如图 2-53 所示。

2.3.5　属性栏

如图 2-54 所示，属性栏可以对树形菜单中的模型、参数(如网格设置参数、求解步数等)、曲线、图片等的属性值进行修改。

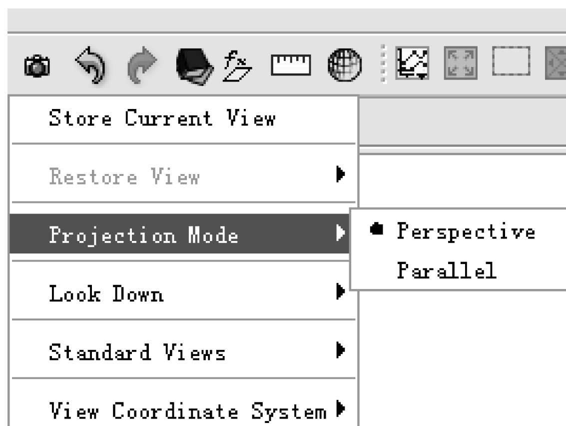


图 2-53　Projection Mode(投影模式)

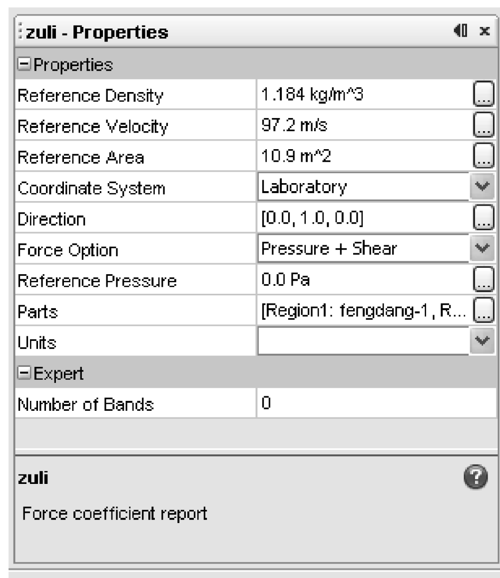


图 2-54　属性栏

2.3.6　输出窗口

输出窗口可以输出网格划分操作、计算结果和操作结果等过程文件，以及 Report 等结果分析文件，如图 2-55 所示。

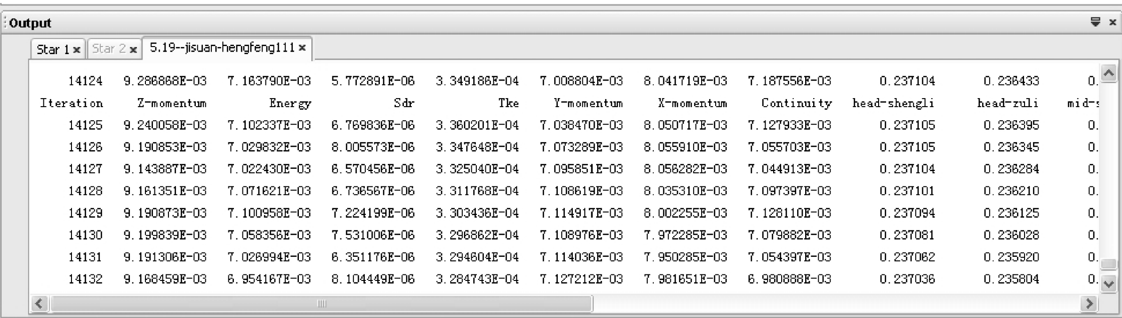


图 2-55　输出窗口

在设置计算模型或网格划分时，输出窗口对所进行的每一步操作进行显示，方便用户检查和掌握工作情况。

在计算过程中，输出窗口实时输出计算结果，同时计算中若有问题出现，信息栏中将列出问题的主要原因，便于处理。

2.3.7　鼠标操作

鼠标操作较为方便。使用鼠标操作在视图窗口中可以实现旋转、放大/缩小、平移等功能。鼠标操作功能示意图如图 2-56 和表 2-2 所示。

种类	旋转	放大/缩小	平移
方法	鼠标左键	鼠标中键	鼠标右键
		缩小 放大	

图 2-56　鼠标操作功能示意图

表 2-2　鼠标使用方法

鼠标按键	功　能	使用方法
左键	旋转	需一直按着
中键	缩放	持续按着中键 如往前移动鼠标，则为缩小 如往后移动鼠标，则为放大
右键	平移	需一直按着

2.4　前处理工具介绍

前处理是对模型网格进行处理，通过对网格质量检查、修补，更真实地反映模型的实际特征，从而通过数值仿真分析，获得准确的流场信息。

STAR-CCM + 的三种仿真分析模式如图 2-57 所示。STAR-CCM + 的独特之处就是拥有别的主流 CFD 软件没有的网格包面功能。

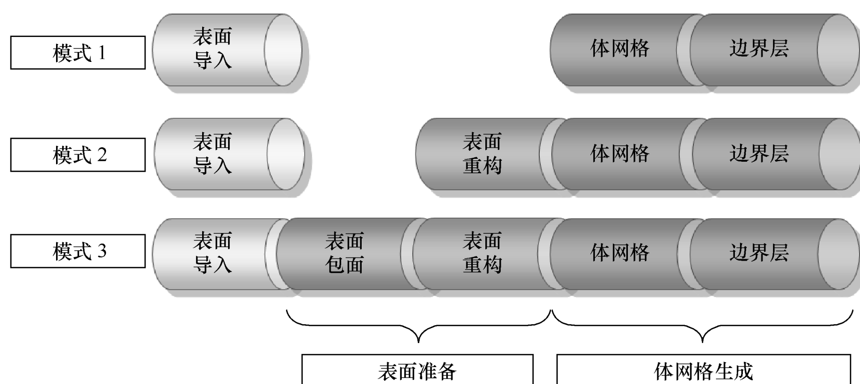


图 2-57　STAR-CCM + 的三种仿真分析模式

2.4.1　包面功能概述

表面包面是一种对原始 CAD 表面的拟合逼近技术，能够自动地封闭计算域的拓扑表面，修复 CAD 导入表面的穿刺、干涉、重叠、缝隙、小漏洞等错误。由于包面是对计算模型轮廓进行捕捉，故其首要前提是要保证计算域内的计算模型表面是一个单流通封闭的区域。

CAD 表面导入后，首先通过 Repair Surface 工具(图 2-58)，检查 Import 表面网格是否有 free edge(自由边)、non-manifold edges(重复边,指两个面网格相交处存在两条以上边)、non-manifold vertices(重复点,指两条边相交处存在两个以上点)、self-intersections(面网格交叉)这四项错误，如图 2-59 所示。如果检测出来的错误网格数较少，可手动对 Import 网格中有问题的部分网格进行修整；若检测出来的错误网格数较多，就有必要使用表面包面功能来修复 CAD 表面，保证这四项错误为接近于 0，方可进行体网格划分和计算。

如图 2-60 所示，包面之前进行 Import 网格检查，存在较多错误。而经过包面操作后，质量较差的网格数目减少很多，如图 2-61 所示。

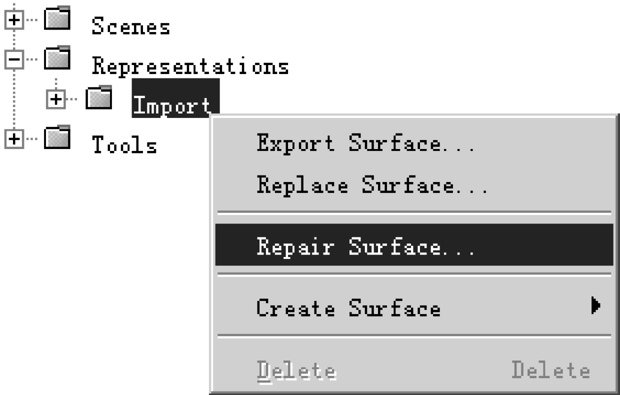


图 2-58 检查 Import 表面网格

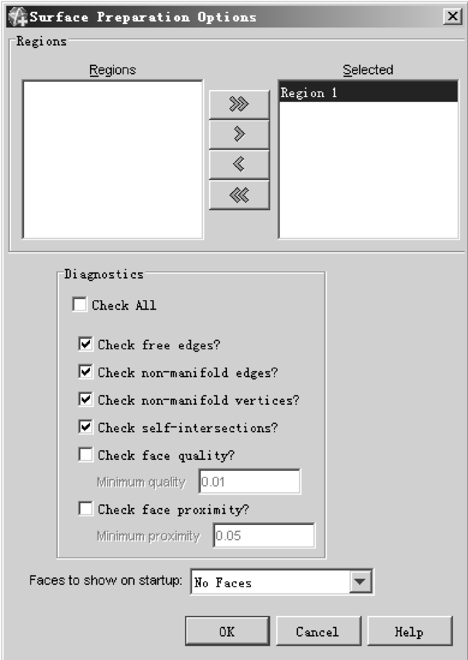


图 2-59 网格检查的四个基本项

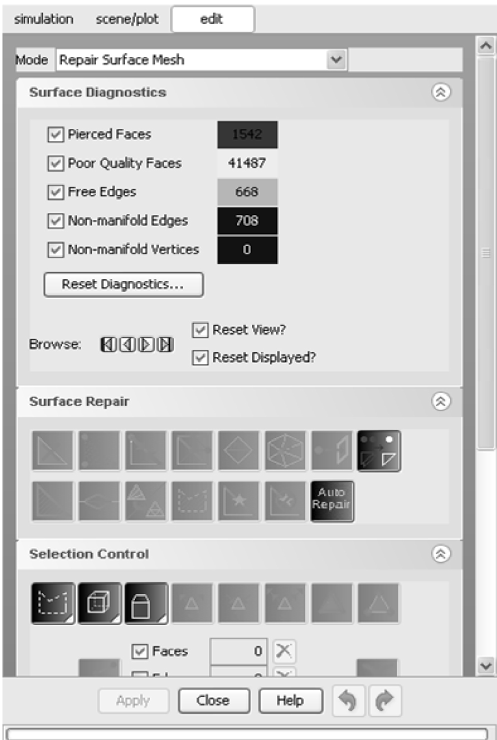


图 2-60 包面之前 Import 网格检查

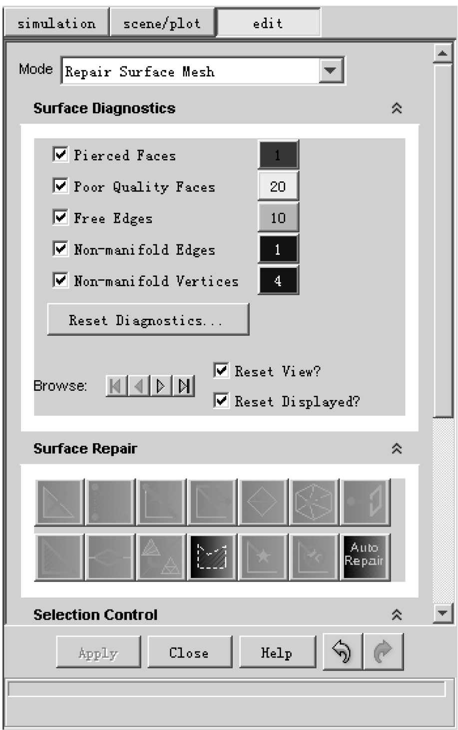


图 2-61 包面之后 wrapper 网格检查

包面网格尺寸 = Base Size[m] × Target Size[%] × Wrapped Scale Factor[%]

2. 4. 2　重构功能概述

表面重构是在已有拓扑封闭表面的基础上，提升三角形表面网格质量的技术，可以为生成高质量的体网格做好准备。

CAD 表面导入后，如果通过 Repair Surface 功能检测结果，四项错误数均较少，就可以直接使用表面重构功能提升三角化表面的质量了(不必再进行表面包面)。而包面后的网格质量一般不会很好，因此也可以在表面包面完成的基础上再进行表面重构。

如图 2-62 和图 2-63 所示，重构前包面网格质量较差，而重构后包面网格质量有较大提升。

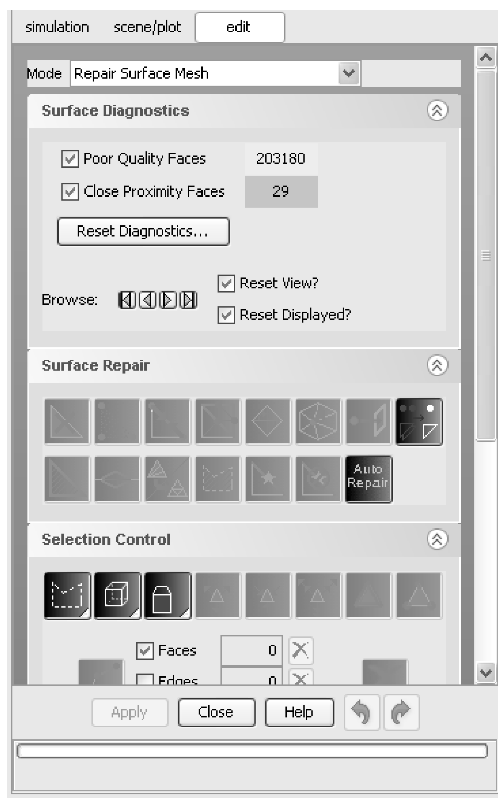


图 2-62　重构前包面网格质量

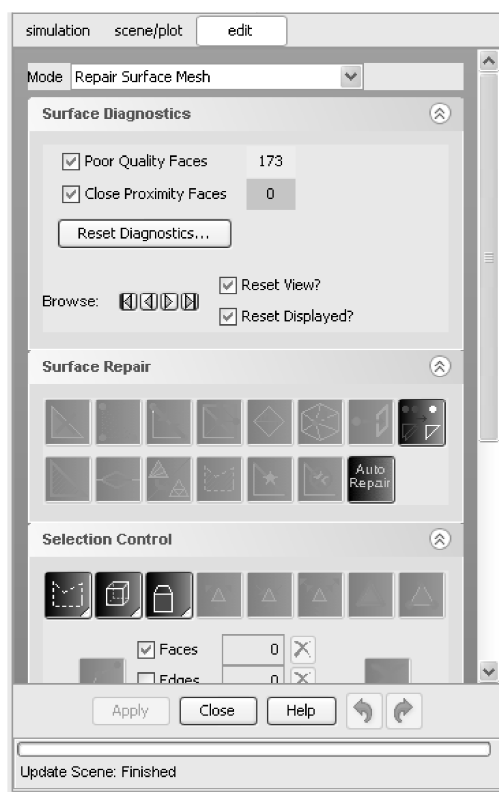


图 2-63　重构后包面网格质量

2. 4. 3　面网格检查和修补功能

1. 表面网格的检查漏洞功能

点击[Continua] > [Mesh 1] > [Models] > [Surface Wrapper]，右键选择[run leak detection. . .]选项，即可进行表面网格的检查漏洞，如图 2-64 所示。

具体方法是：通过建立物体内的目标点 Target point、计算域内的源点 Source point，寻找两点之间有无通道(path)可以相连，若有则说明物体不是全部封闭的，需要进行表面网格修补。查看两点连线与物体表面的相交处，即能发现物体表面存在的漏洞。进入面网格修补

工具中，可对其进行处理。一般检查出的漏洞在尺寸上均大于包面尺寸。

接着检查漏洞，直至不再发现问题。此时再进行包面操作，则不会出现“包”到物体内部的情况了。比如，采用同样的尺寸，在未检查漏洞前，第4章中小汽车直接包面后的面网格数量为260万左右，而检查和处理好表面后，面网格数量减少为86万左右。第一次包面的网格数目较多，就是因为包面时通过漏洞捕捉到了小汽车车内的特征。

表面网格检查漏洞的详细操作参见第4章。

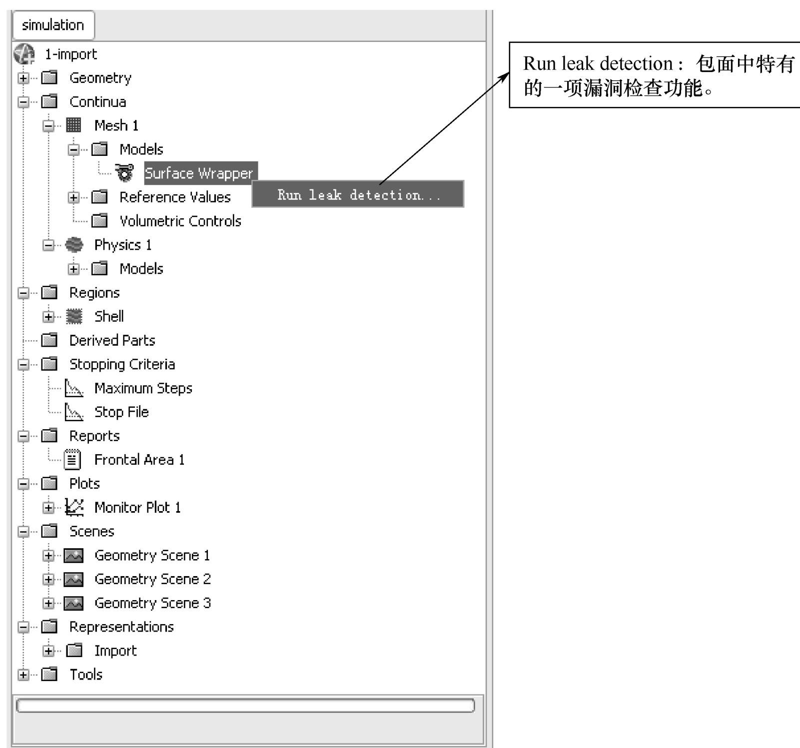


图2-64　漏洞检查工具

2. 表面修复功能

在树形菜单项[Representations]中，可以选择“Import”、“Wrapped Surface”、“Remeshed Surface”这三项进行修复。但由于重构后质量较差的网格较少，费时较少，一般选择“Remeshed Surface”进行修复。

如图2-65所示，点击[Representations]>[Remeshed Surface]，右键选择[Repair Surface...]，弹出“Surface Mesh Repair Options”对话框，如图2-66所示。

点击“OK”按钮，打开“Surface Preparation Options”对话框。

按照网格精度要求，修改“Surface Preparation Options”对话框中的“Check face quality”项和“Check face proximity”项的值。一般设置“Check face quality”项为0.5或0.6，设置“Check face proximity”项为0.2或0.3，如图2-67所示。

网格检查结果如图2-68所示。

Surface Repair 工具栏中的一系列手工修复工具提供了基于点、线、面对三角化表面进行修复的功能。Surface Repair 工具栏还提供了一个自动修补工具 Auto Repair(位于图2-61中

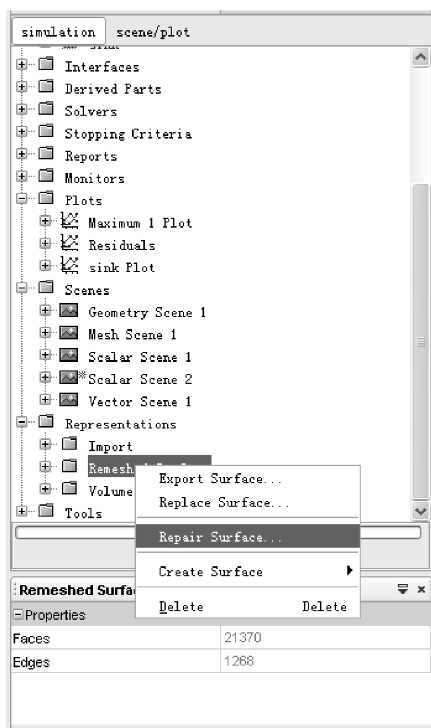


图 2-65　检查重构网格

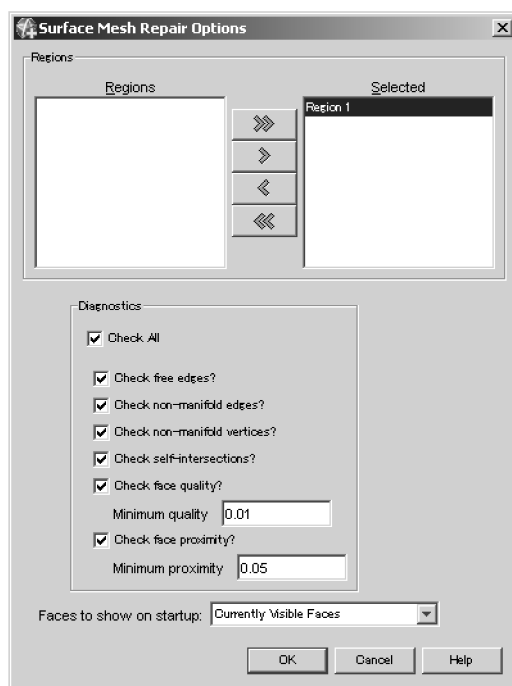


图 2-66　"Surface Mesh Repair Options" 对话框

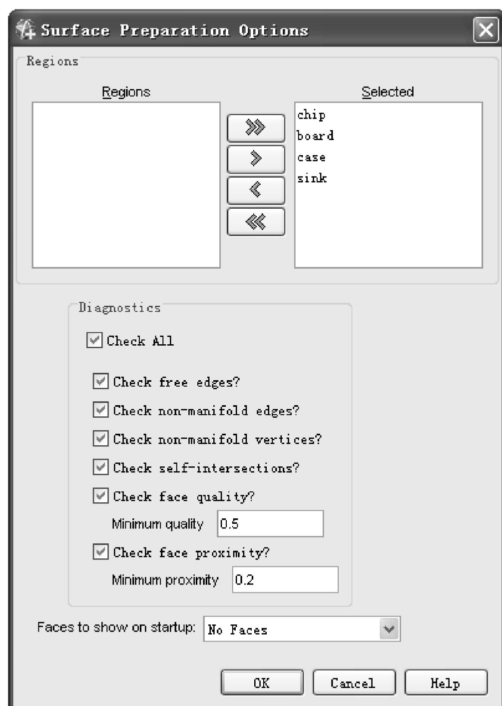


图 2-67　修改检查标准

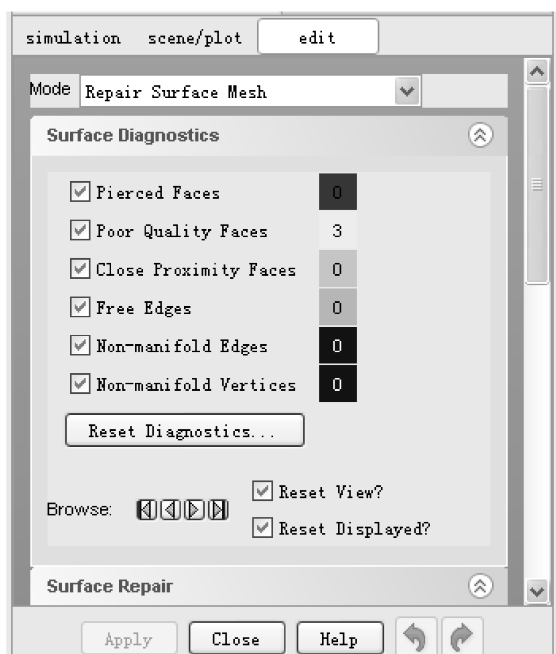


图 2-68　网格检查结果

Surface Repair 工具栏中第二行最后一个)，可以在大多数情况下自动完成对各项错误的修复。但如果模型存在狭缝、尖角等不规则几何表面的情况，则应慎用。

对包面后的模型网格进行重构，可以提升网格的质量，但是很难保证网格质量均较优，一般情况下：质量好的网格，其所有面的法线通过网格的重心；质量不好的网格，至少有一个面的法线通过邻近网格的重心，如图 2-69 所示。面网格如果是非正交的，则质量会下降。网格质量越接近零，则越不利于计算。

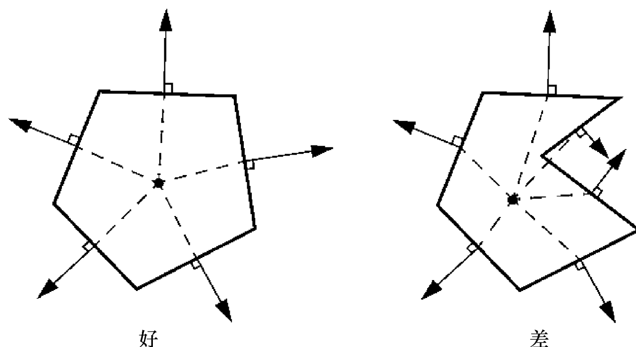


图 2-69　面网格质量好的网格和面网格质量差的网格

（1）Surface Errors 面板　Surface Errors 面板中各项工具的含义及快捷键等信息如图 2-70 所示。

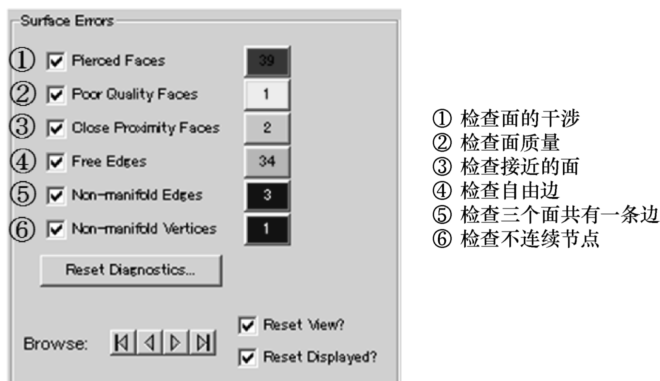


图 2-70　Surface Errors 面板

（2）Surface Repair 面板　Surface Repair 面板如图 2-71 所示。各项工具的含义及快捷键等信息如表 2-3 所示。

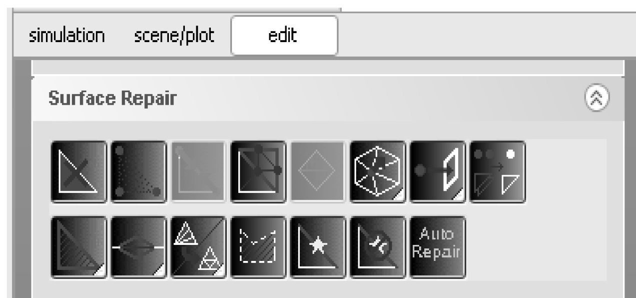


图 2-71　Surface Repair 面板

表 2-3　Surface Repair 面板中各工具对应图标及操作含义

命　　令	对 应 操 作	按 钮 图 标	快　捷　键
Delete selected faces	删除面网格		D
Create face from selected vertices	三点创建面		V
Collapse selected vertices	合并线段/合并两点		C
Split selected edges/ faces	细化网格面或者线		S
Swap selected edge	重画对角线		W
Smooth selected/attached vertices	调整节点位置		M
Project selected vertice to a plane	将点映射到平面上		L
Merge adjacent vertices/duplicate faces	merge 节点/复制面		J
Fill hole using selected edges	通过边生成面/填补漏洞		H
Zip selected edges	压缩两条边		Z
Remesh selected faces	优化网格/重画网格		R
Fill polygonal patch	在选中的范围内生成面		P
Flag edges as feature	形成特征线		U
Unflag feature edges	取消特征线		F
Auto-repair surface errors	自动修复	Auto Repair	A

注：使用以上快捷键尤其是单个字母对应的快捷键，应切换到英文输入法状态，软件才能识别并进行相关操作。

（3）Selection Control 面板　Selection Control 面板如图 2-72 所示。各项工具的含义及快捷键等信息如表 2-4 所示。

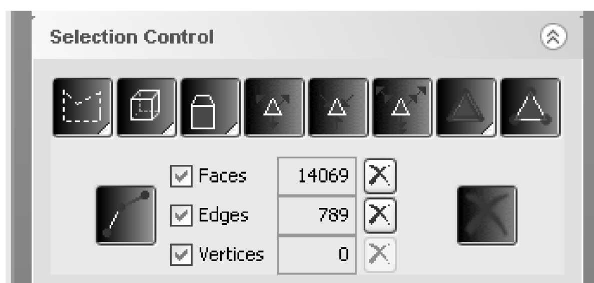


图 2-72　Selection Control 面板

表 2-4 Selection Control 面板各工具对应图标及操作含义

命　令	对应操作	按钮图标	快捷键
Select zone	指定选择范围		Shift + Z
Select geometric range	指定坐标值选择		Shift + R
Select faces on boundaries	在边界上选择面		Shift + B
Grow selected	扩大网格选择范围		“ + ”
Shrink selected	缩小网格选择范围		“ – ”
Multiple grow selected	扩大选择范围(指定范围)		Shift + M
Select attached edges	选择已经选定单元连接的边		Shift + E
Select attached vertices	选择已经选定单元连接的点		Shift + V
	显示选择的面、边、点数，可勾选其中一个进行选择	Faces 14069 Edges 789 Vertices 0	

注：点击点、线、面，按“ + ”号，均可扩展所选网格。

（4）Display Control 面板　Display Control 面板如图 2-73 所示。各项工具的含义及快捷键等信息如表 2-5 所示。



图 2-73　Display Control 面板

表 2-5 Display Control 面板各工具对应图标及操作含义

命　令	对应操作	按钮图标	快捷键
Show all faces	显示所有的面		Ctrl + A
Hide all faces	隐藏所有的面		Ctrl + Shift + A

（续）

命　　令	对 应 操 作	按 钮 图 标	快　捷　键
Show selected faces	只显示所选的面		Ctrl + F
Hide selected faces	隐藏所选的面		Ctrl + Shift + F
Show faces on Boundaries	显示选择的 boundary 上的面		Ctrl + B
Hide faces on Boundaries	隐藏选择的 boundary 上的面		Ctrl + Shift + B
Grow displayed faces	扩大显示范围		Ctrl + “ + ”
Shrink displayed faces	缩小显示范围		Ctrl + “ – ”

2.4.4　一些网格修复技巧

1. 直角边网格修复

在修整几何特征比较复杂的网格时，一定注意保证几何表面的平顺，此时特征线的保留能起到很大的促进作用。如图 2-74 所示，如包面后个别部位特征线较为凌乱，没有保持原有的直壁特征，则此处体网格质量可能较差，建议删除此处面网格，先建立一条特征线，再在此处重画网格。经过这样的修整，体网格质量会有较大幅度的提升。

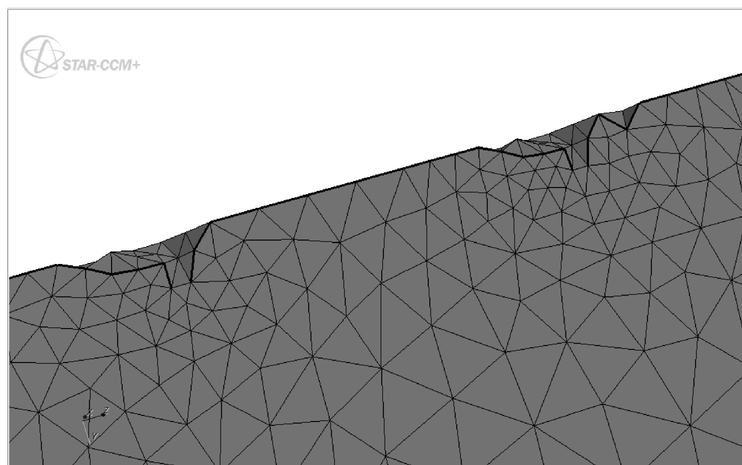


图 2-74　包面后网格质量较差的部位

选择该处质量不好的网格，全部删除，如图 2-75 所示。

利用三点建立一个三角形网格。选择三角形顶点时，注意必须保证一边与其他直角边保持一致(在一条直线上)，以保证此处网格质量。因此需将该边设为特征线，选择该边，按键盘“F”键标志特征线，如图 2-76 所示。

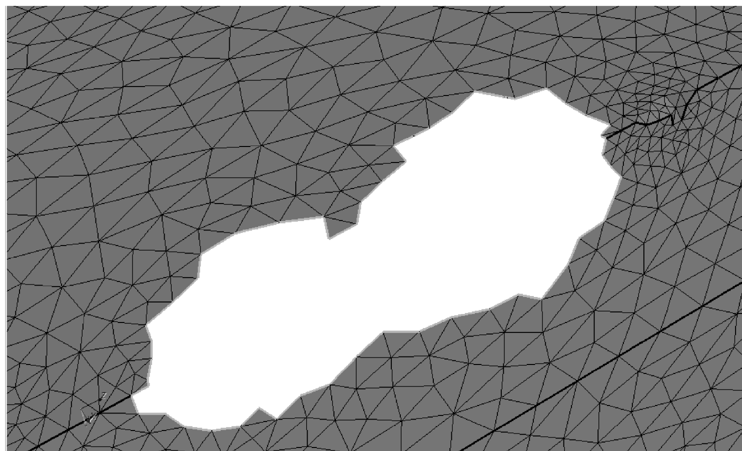


图 2-75 删除质量不好的网格

建立另一个三角形，以便将特征线两边将要进行面网格修复的网格区域分开，一次操作完成两边的面网格修复，同时保证棱角特征，如图 2-77 所示。

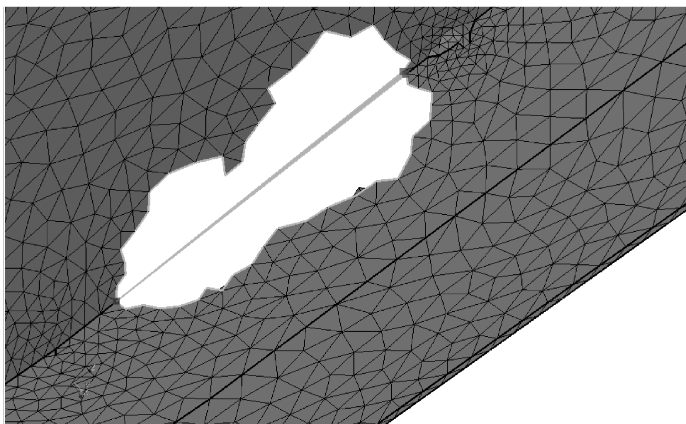


图 2-76 建立三角形网格

全选所有漏洞区域的边，点击“Hole”，即完成网格修补，如图 2-78 所示。

此时该区域面网格质量较差，需进行重画操作，以优化网格质量。全选修补网格，按三次“+”键(扩大所选范围)，再按“R”(优化网格/重画网格)键，即成功完成网格修补工作。由图 2-79 可知，该处划分体网格时，不会再出现质量较差的体网格。

2. 窄网格处理方法

在处理面网格时，往往会遇到图 2-80 中的窄网格，这些网格质量较差，需进行修补处理。

选择四个质量较差的网格中心的网格，点击合并操作(按键盘 C 键)，即可成功修复网格，如图 2-81 所示。

还经常遇到图 2-82 所示的质量较差的网格(图中为白色)。

相应的做法是，选择相邻网格的共同边，进行合并操作即可成功修复网格，如图 2-83 所示。

而对于图 2-84 中的网格，可选择两条近似平行的边，进行压缩操作(按键盘 Z 键)。

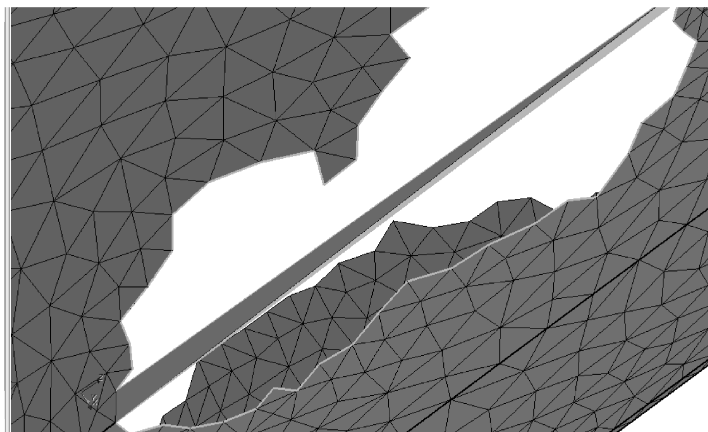


图 2-77　再次建立三角形网格

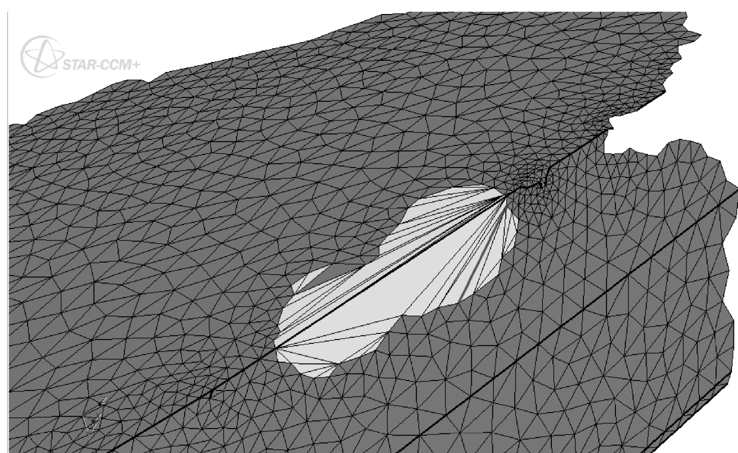


图 2-78　修补网格

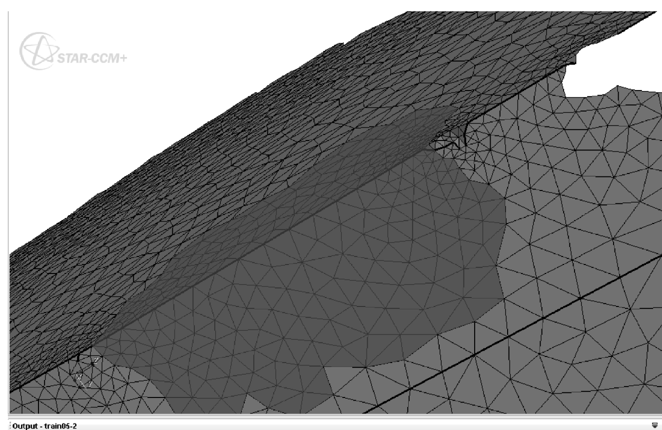


图 2-79　优化网格质量

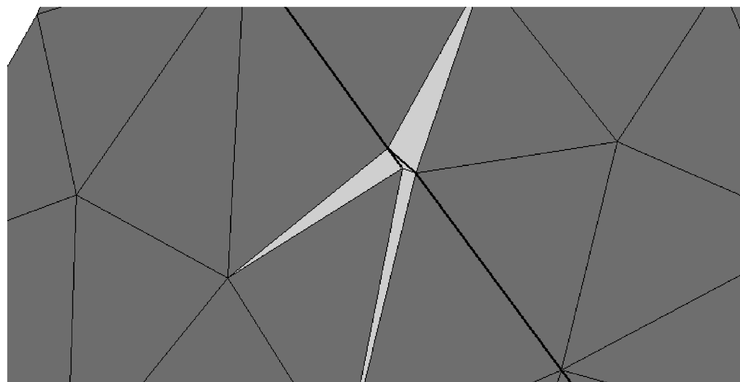


图 2-80 窄网格

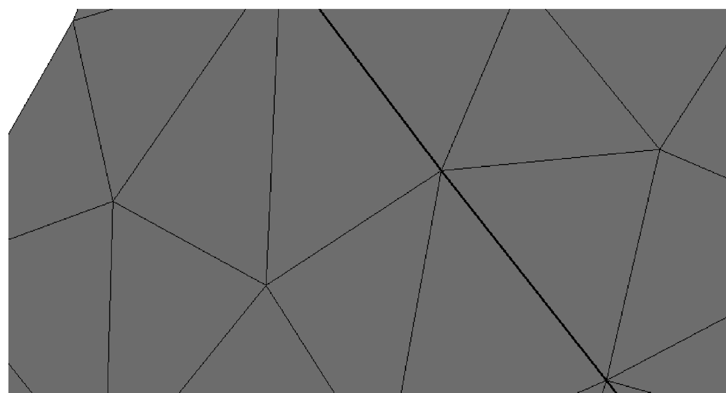


图 2-81 修复成功的网格(一)

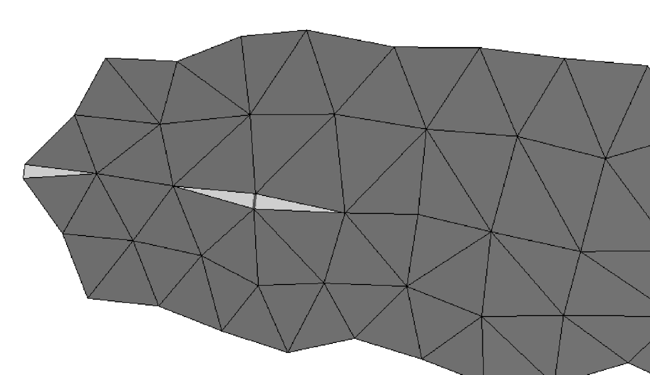


图 2-82 质量较差的网格

压缩后会出现黄色的质量较差网格，如图 2-85 所示。

合并相邻网格的共同边，即成功修复此处网格，如图 2-86 所示。

对于图 2-85 中有较多网格需要修补的情况，还可以双击选中黑色的特征线，按键盘“U”键取消特征线(同时保留选择这些边)，按三次“+”键，再按“R”键，即成功完成网格修补工作。

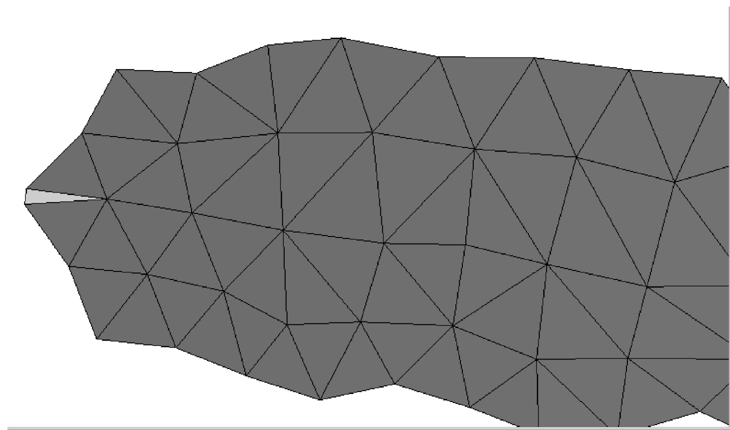


图 2-83　修复成功的网格(二)

3. 点线合并技巧

处理网格时，有时需要进行合并两个点的操作，如图 2-87 所示。

如果选择两点之间的线段，则两个点往压缩边中间合并，如图 2-88 所示；如果先选择点 1，则后选择的点 2 在进行合并操作后，自动合并到点 1 处，周围网格重画，点 1 位置不变，如图 2-89 所示。

点 2 往点 1 合并的以上操作，可以用在棱角附近需要进行网格质量修补且保证外形特征的情况。类似的技巧还很多，可以在使用的过程中不断积累，总结出适合于自己的最方便、最快捷的使用方法。

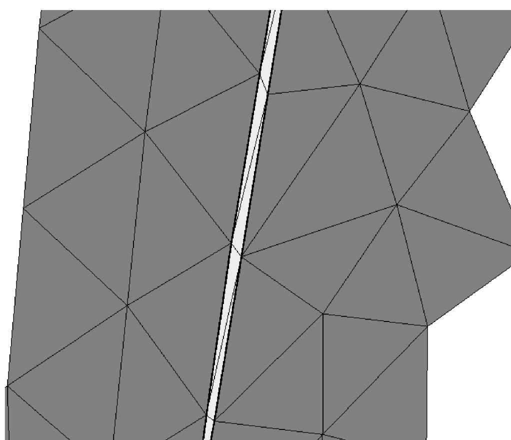


图 2-84　压缩网格

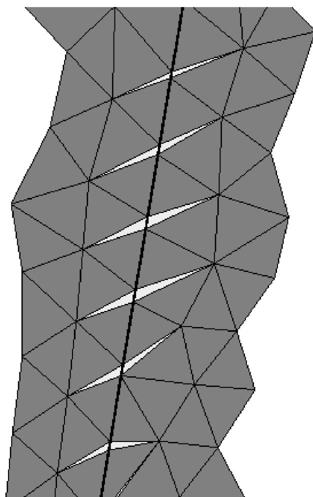


图 2-85　黄色的质量较差网格

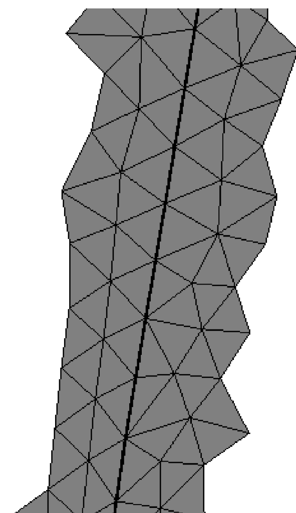


图 2-86　修复成功的网格(三)

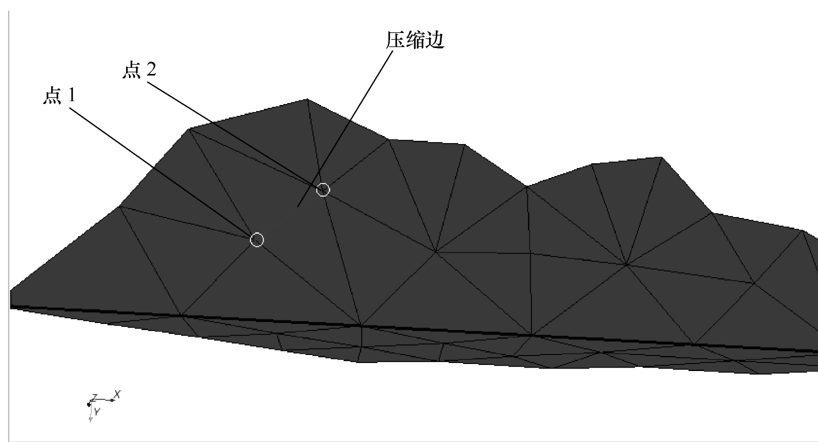


图 2-87　要合并的两个点

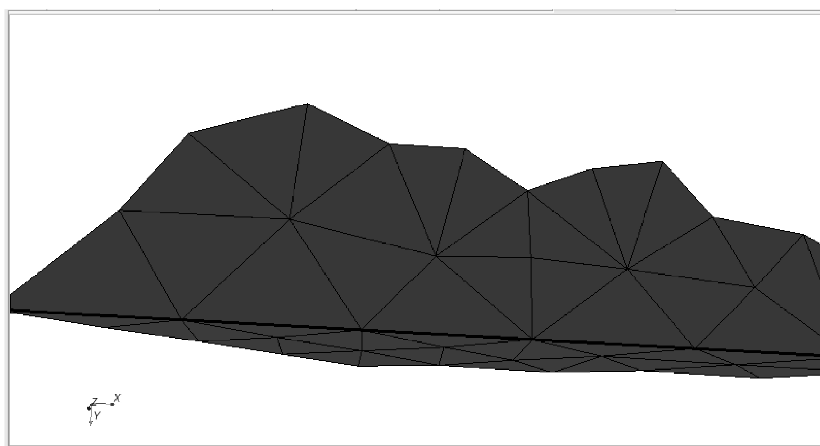


图 2-88　两个点往压缩边中间合并

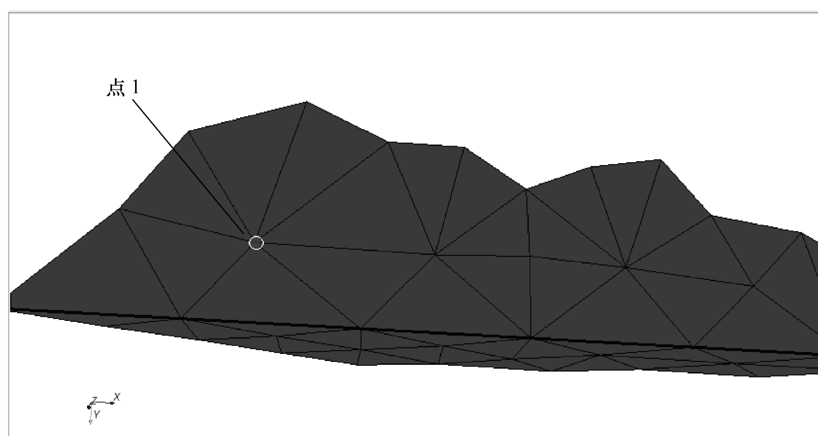


图 2-89　点 2 往点 1 合并

2.5　体网格工具介绍

2.5.1　体网格工具

STAR-CCM + 提供了四种体网格划分工具：Trimmer(以 6 面体或者 12 面体为核心的网格)、Polyhedral Mesher(多面体网格)、Tetrahedral Mesher(四面体网格)、Thin Mesher(薄壁网格)，如图 2-90 所示。一般情况下，选用 Trimmer 网格或者 Polyhedral 网格，相比而言，Trimmer 网格收敛速度比 Polyhedral 网格快。

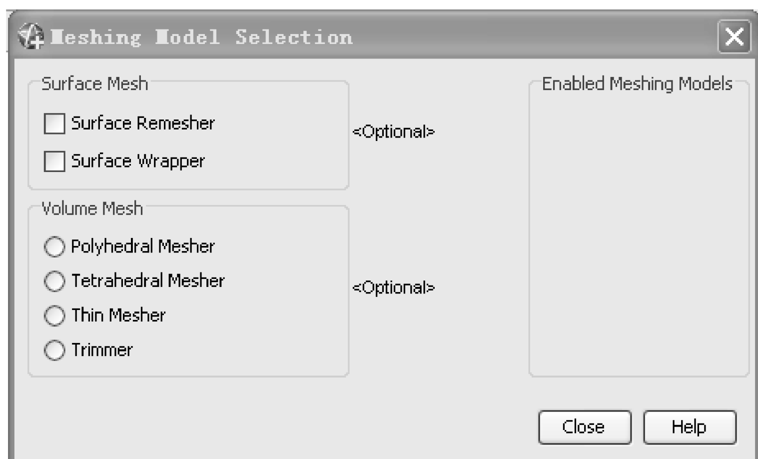


图 2-90　选择体网格

2.5.2　边界层设置

当空气流过物体表面时，由于空气与物体表面的粘附作用，在物体表面会形成一层空气粘附层，即边界层。在边界层内，空气流速沿物体表面法向由零迅速增大到与来流速度基本一致。边界层的厚度在驻点处为零，然后逐渐向下游增加。故沿边界层发展方向，边界层内的气流流速均有变化。为捕捉边界层内的气流流动特征，需要在物体表面划分较为细致的网格。

STAR-CCM + 的 Prism Layer Mesher 工具可在“Meshing Model Selection”工具栏中选择，如图 2-91 所示。

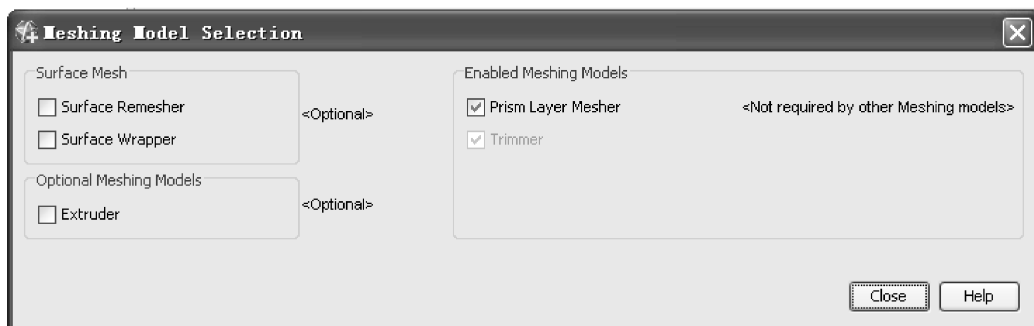


图 2-91　Prism Layer Mesher 工具

边界层的划分有三种方式，如图 2-92 所示。

（1） Stretch Factor（拉伸因子）　采用 Number of Prism Layers（边界层层数）、Prism Layer Stretching（边界层厚度增长因子）、Prism Layer Thickness（边界层总厚度）三项的设置方式。

（2） Wall Thickness（壁面厚度）　采用 Number of Prism Layers（边界层层数）、Prism Layer Thickness（边界层总厚度）两项的设置方式。

（3） Thickness Ratio（厚度比）　采用 Number of Prism Layers（边界层层数）、Prism Layer Thickness（边界层总厚度）、Prism Layer Thickness Ratio（边界层厚度比）三项的设置方式。

树形菜单中的“Number of Prism Layers”项如图 2-93 所示，在其属性栏中，可以修改边界层层数。

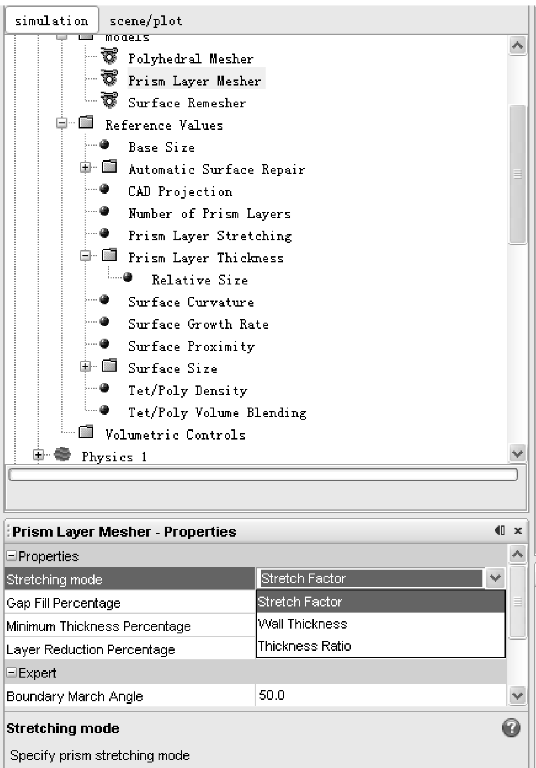


图 2-92　边界层的三种划分方式

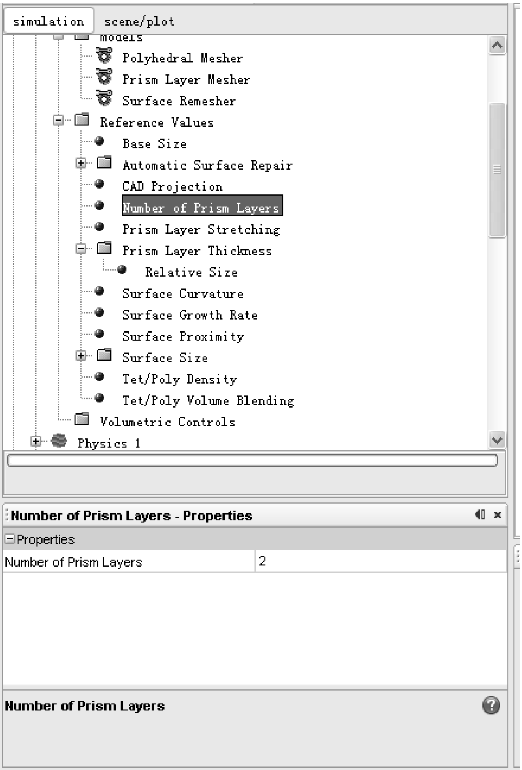


图 2-93　Number of Prism Layers（边界层层数）

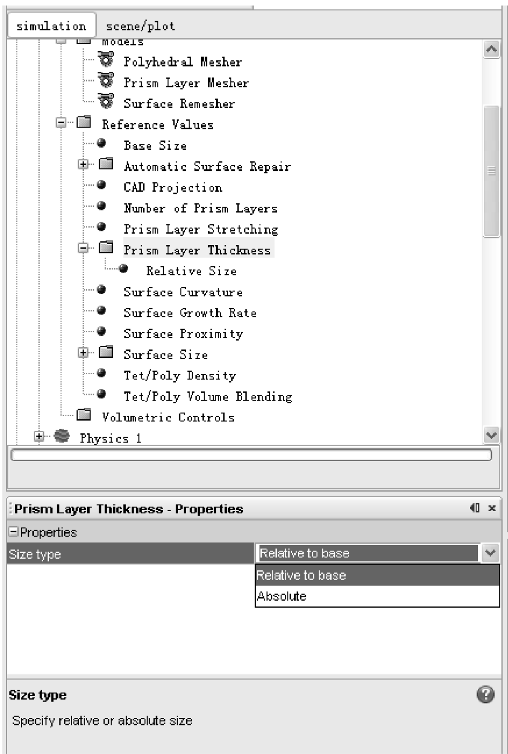


图 2-94　边界层厚度的两种设置方式

边界层的厚度设置有设置占 base size 的百分比和设置厚度绝对值两种方式，如图 2-94 所示。其中，设置占 base size 百分比的方式如图 2-95 所示，设置厚度绝对值的方式如图 2-96 所示。

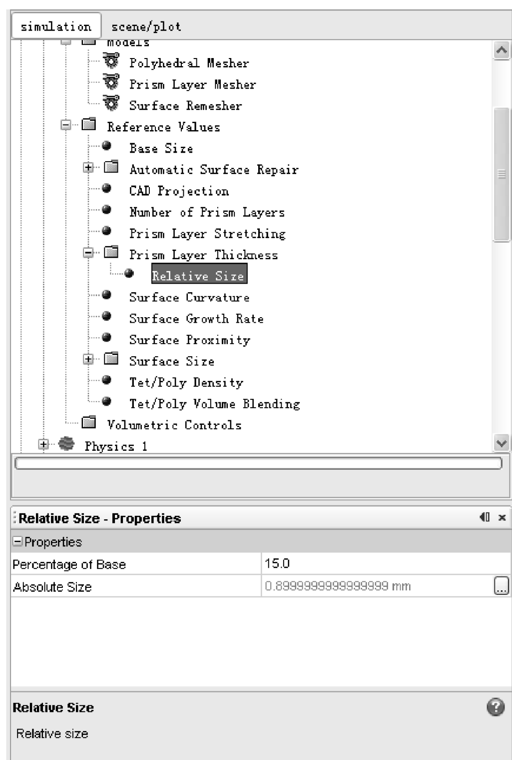


图 2-95　设置占 base size 百分比的方式

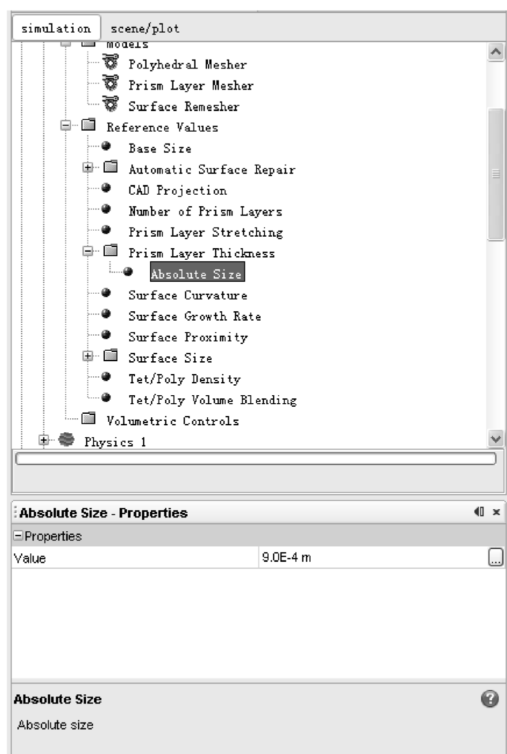


图 2-96　设置厚度绝对值的方式

2.5.3　体网格加密

在生成体网格之前，需要根据实际情况进行体网格加密，通过增加网格数量保证计算模型局部位置的计算精度。

如图 2-97 所示，点击[Tools] > [Volume Shapes]，右键选择[New Shape] > [Block]，Block 的尺寸根据加密区域进行设置。

设置好 Block 后，如图 2-98 所示，点击[Continua] > [Volumetric Controls]，右键选择[New]（注：后文均采用“右键选择[Continua] > [Volumetric Controls] > [New]”的合并表述方式，用户在基本了解软件树形菜单形式及功能后，可根据图示进行操作），新建网格加密控制区 Volumetric Control 1，然后进行相关编辑，包括选择对应的 Block 以及加密区网格的尺寸。本书后面几章将会详细讲述该部分内容。

2.5.4　体网格质量标准

在划分体网格时，可以对一种目标尺寸采用多种最小尺寸，找到一种相应于复杂表面网格质量最好的划分方式。

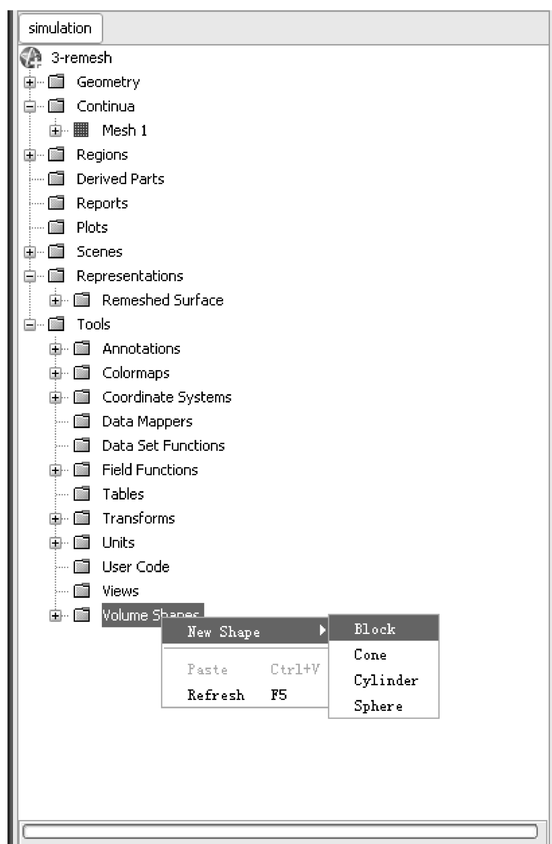


图 2-97 设置加密区

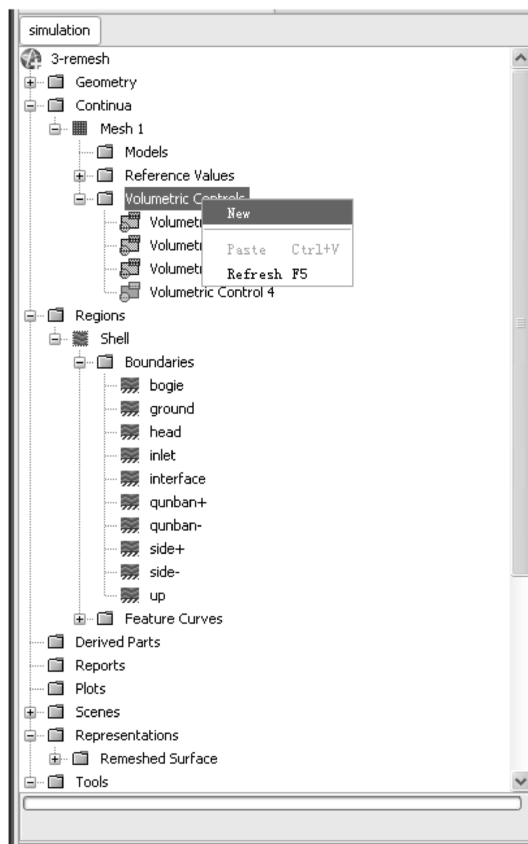


图 2-98 设置网格加密控制区

生成体网格后，为保证计算能够很好地收敛，需对网格质量进行检查。体网格质量有以下衡量指标：

1. 体积变化率(Volume Change Ratio)

体积变化率表示某个体网格体积与邻近体积最大网格的体积之比。体积变化率好的网格和体积变化率差的网格如图 2-99 所示。如值为 1.0 则表示该体网格体积等于或大于邻近的网格。如果该网格体积相对于邻近网格较小，就应该用体积比来衡量网格质量。体积变化率小于 1×10^{-5}的体网格，应该进行处理。

2. 面网格质量(Face Validity)

这里的面网格质量指体网格划分后，体网格单元的表面网格质量。质量好的网格，其所有面的法线通过网格的重心；质量不好的网格，至少有一个面的法线通过邻近网格的重心。面网格质量为 1.0，即指该网格所有面的法线正好都通过网格的重心，如图 2-69 所示。一般要求面网格质量在 0.8 以上。网格质量越接近零，则越不利于计算。

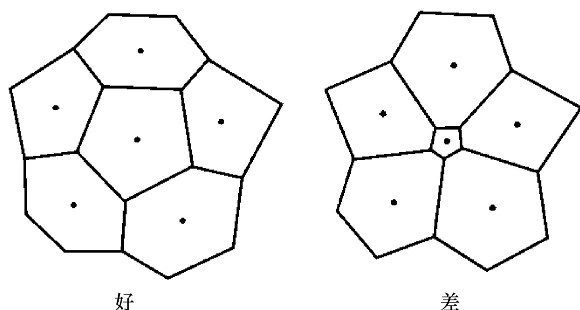


图 2-99 体积变化率好的网格和体积变化率差的网格

3. 体网格质量(Cell Quality)

一般情况下，体网格的各面如果是非正交的，则体网格质量会下降，如图 2-100 所示。网格质量为 1.0 视为优良。网格质量越接近零，则越不利于计算。一般情况下，应不低于 1×10^{-6}。

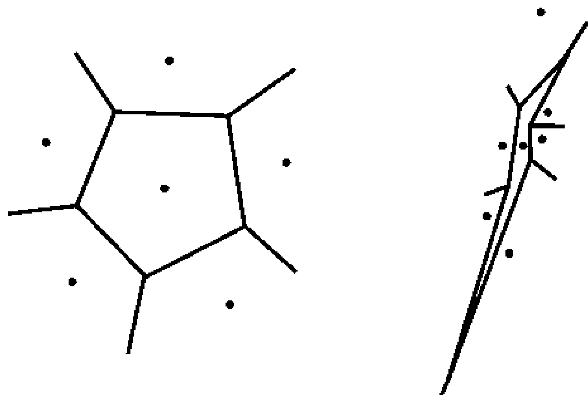


图 2-100　体网格质量好的网格和体网格质量差的网格

质量较差的网格还可通过 Threshold 极限值判断功能来评判和量化，通过统计以上指标的最小值，可找出不同范围内的统计值，以评判网格质量的好坏。同时显示出对应的网格，就会在视图区看到一些粉红色的网格，这些就是满足查询条件的质量较差的网格，如图 2-101 所示。Threshold 极限值网格检查的具体用法将在第 4 章详细讲述。

Threshold 极限值判断功能可有效指出质量较差的网格对应的模型局部位置和面网格的位置。根据图 2-101 中网格对应的位置进行面网格的修整，可以有效地提高体网格质量。

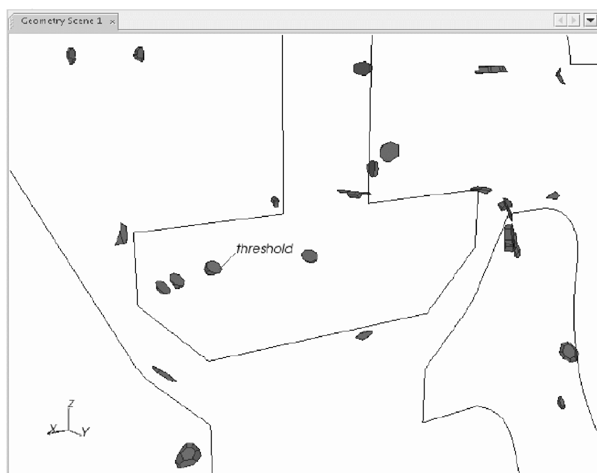


图 2-101　Threshold 网格

2.6　求解器

STAR-CCM + 的空间模型包含二维、三维两种。时间格式包括稳态、显式非稳态、隐式非稳态三种。运动模型包含运动参照系模型、刚体运动模型两种。流动模型包括无粘、层流、湍流三种。介质模型包括气体、液体、固体和多孔介质等。

湍流模型包括 Spallart-Allmaras 方程、K-Epsilon 方程、K-Omega 方程、雷诺应力输运方程、壁面处理方程（Low y + , High y + , All y + ）、壁面距离方程（Exact, Approximate）、边界层模型(Prescriptive boundary-layer transition)等。

STAR-CCM + 求解器主要有分离式求解器(Segregated Flow)和耦合式求解器(Coupled Flow)两种，如图 2-102 所示。分离式求解方法主要用于不可压缩或低马赫数压缩性流体的流动。耦合求解方法则可以用于高速可压缩流动。对于高中速可压缩流动，或需要考虑体积力(浮力或离心力)的流动，求解问题时网格要比较密。如果采用耦合式求解方法求解能量和动量方程，可较快地得到收敛解。缺点是需要的内存比较大(是非耦合求解迭代时间的 1.5 ~2.0 倍)。

对于不可压缩流和可压缩流，软件均可采用分离解法(Segregated Solver)和耦合解法(Coupled Solver)两种方法。目前，分离解法多用于不可压流计算(如第3章中散热器换热计算和第4章中汽车外流场计算的例子)，而耦合解法多用于可压流计算(如第5章中列车明线运行和横风运行工况气动性能计算的例子)。

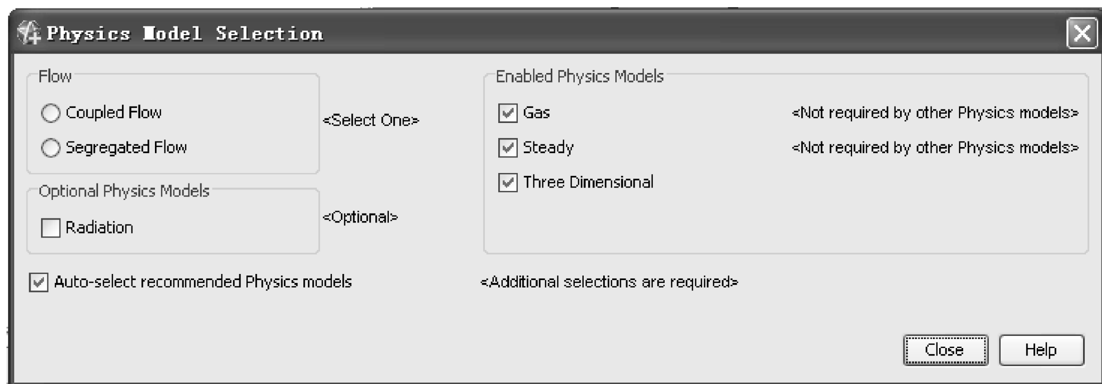


图 2-102 STAR-CCM+求解器

2.7 后处理

后处理方式主要包括以下7种。

1. 标量云图/等值线图(Scalar)

可以通过属性栏选择要显示的part及物理量函数(压力或者流速)，显示出部件或模型整体的速度云图、压力云图、温度云图，如图2-103所示。这些云图均对应整个压力或速度范围内的图例，如图2-103下部所示。

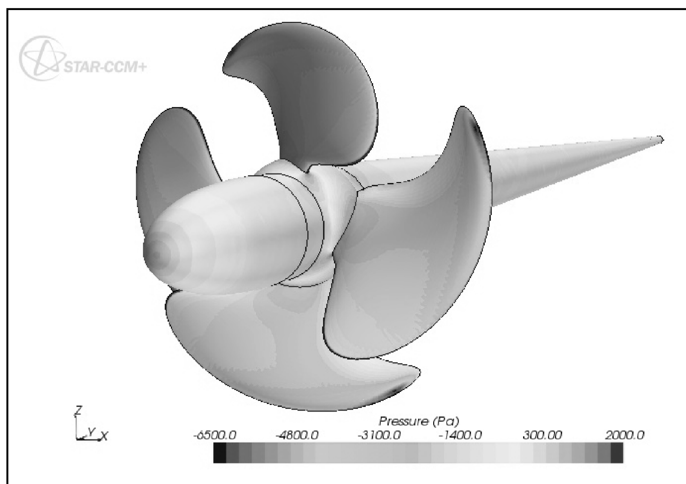


图 2-103 叶轮机械叶片表面的压力云图

2. 矢量图(Vector)

可以通过属性栏选择要显示的part及物理量函数(压力或者流速)，显示出截面或三维

区域的速度矢量图，如图 2-104 所示。

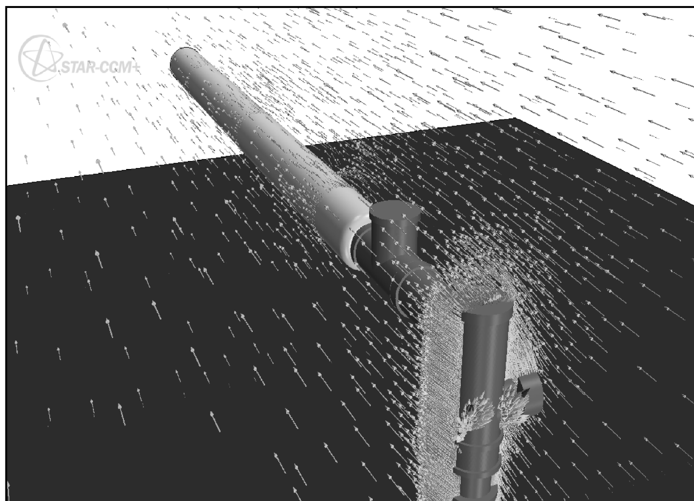


图 2-104　速度矢量图

3. 流线图(Streamline)

如图 2-105 所示，选择[Derived Parts] > [New Part] > [Streamline...]，可以进行流线绘制。

如图 2-106 所示，选择[Derived Parts] > [New Part] > [Constrained Streamline...]，可以进行贴体流线绘制。

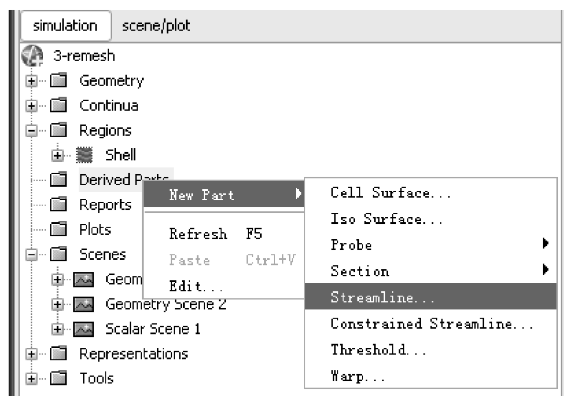


图 2-105　绘制流线

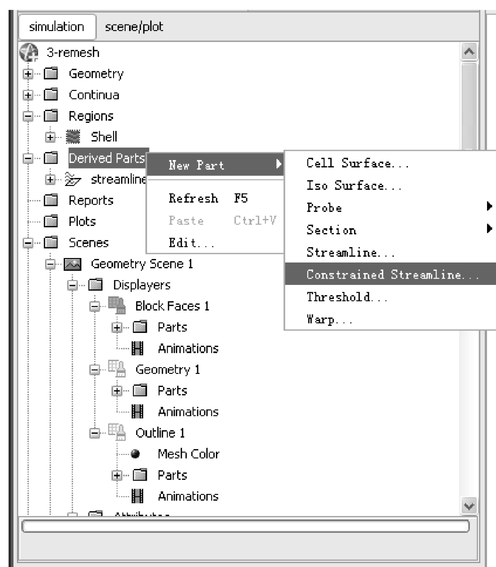


图 2-106　绘制贴体流线

图 2-107 为流线图绘制工具栏，用以设置流线相关参数。图 2-108 为利用 STAR-CCM +软件计算和绘制的赛车车身和尾部流线。

制作流线动画，依次点击[Scenes] > [Scalar Scene 1] > [Displayers] > [Streamline Stream 1] > [Animations]，将属性窗口中“Animation Mode”项选择为“Tracers”，激活动画功能，如图 2-109 所示。

修改[Scenes] > [Scalar Scene 1] > [Displayers] > [Streamline Stream 1] > [Animations] > [Streamline Settings]属性栏设置，如图 2-110 所示。设置完成后，点击动画播放按钮▶，即可开始播放动画。

注意：在输出动画之前，至少要点击过一次播放按钮，待动画结束后再输出。

4. 衍生体(Derived Parts)

衍生体包括平面切面、曲面切面、任意切面、探测点、Iso 等值面、Threshold 阈值面和网格单元表面等。衍生体的生成方法如图 2-111 所示。

新产生的衍生体也可以用于标量云图、矢量图、流线图的创建和显示。

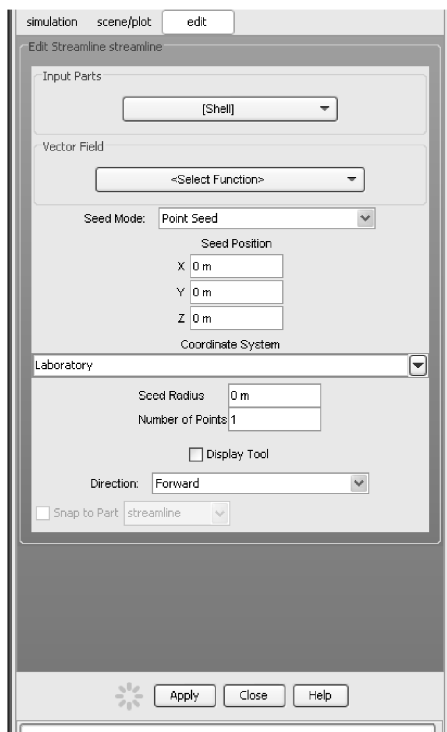


图 2-107　流线图绘制工具栏

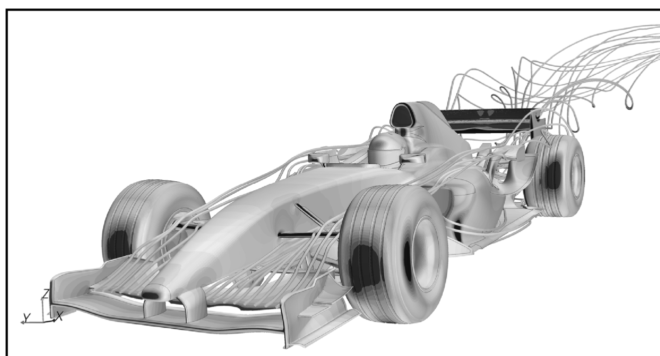


图 2-108　赛车车身和尾部流线

5. 报告(Reports)

如图 2-112 所示，Reports 项包括以下函数或统计值：面积平均值、流量平均值、体积平均值、最大值、最小值、投影面积、力、力系数、力矩、力矩系数、传热量、求和、积分、统计计算时间等。

6. 监视器(Monitors)

监视器的功能包括：监视各方程的残差值、监视报告(Report)值、监视场均值(Field Mean)、监视场和值(Field Sum)、监视场变化值(Field Variance)和监视场协方差(Field Covariance)等，如图 2-113 所示。

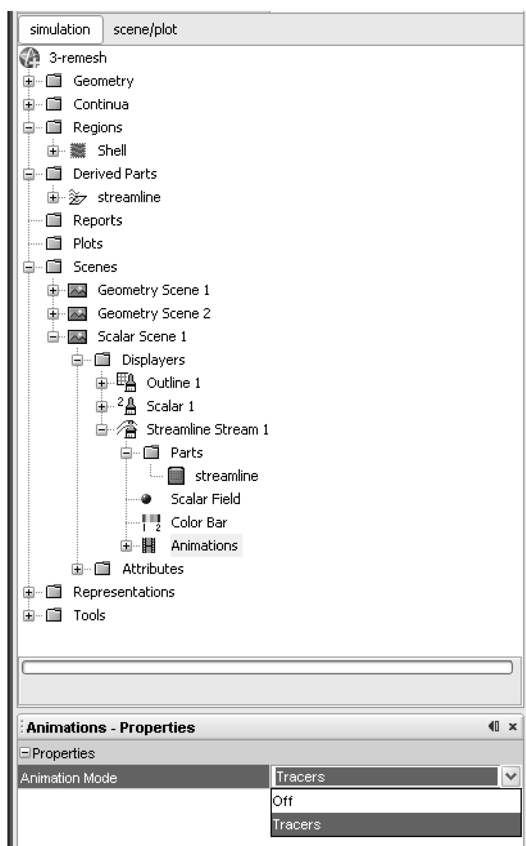


图 2-109　激活动画

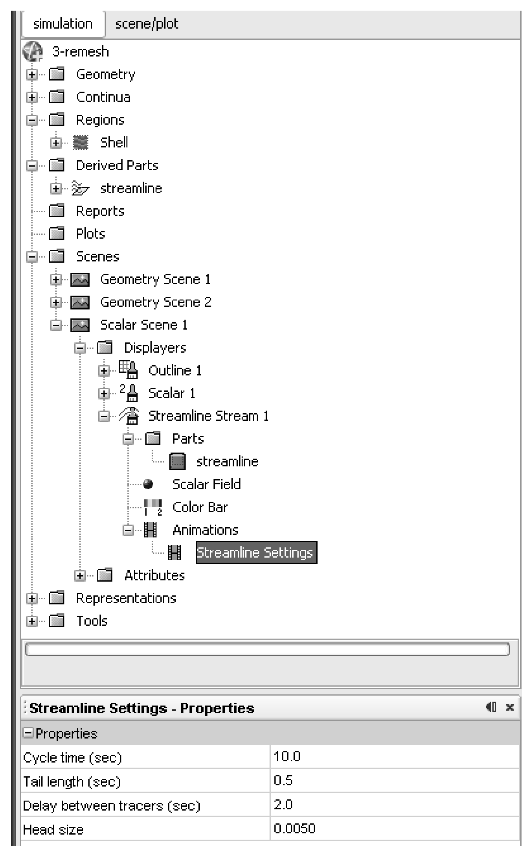


图 2-110　修改动画设置

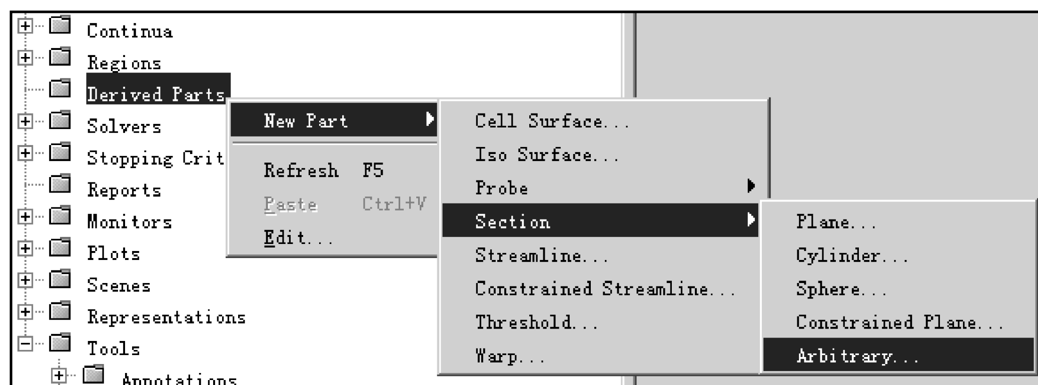


图 2-111　衍生体的生成方法

7. 绘图(Plot)

绘图的功能包括：绘制残差曲线图、绘制监视(Monitor)曲线图和绘制 XY 曲线图，如图 2-114 所示。

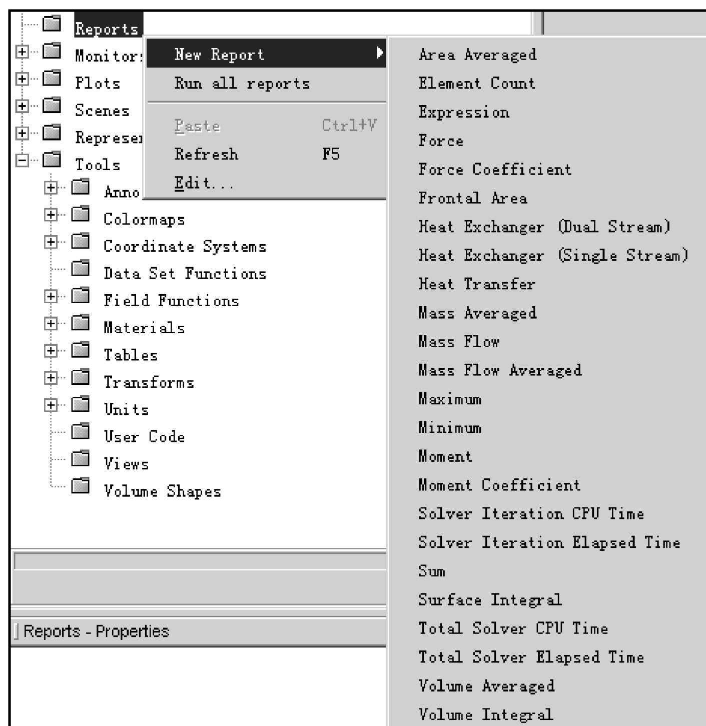


图 2-112 Reports 项包括的函数或统计值

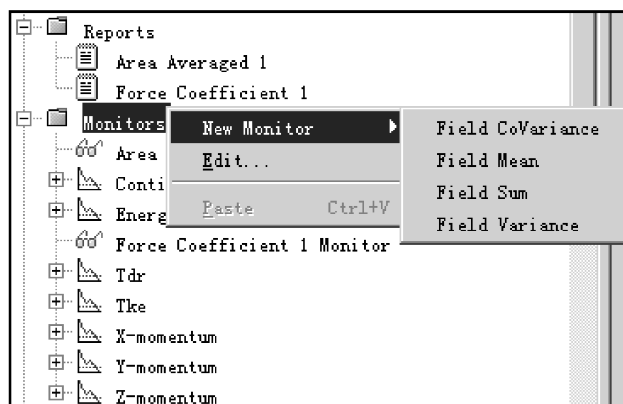


图 2-113 监视器的主要功能



图 2-114 绘图的主要功能

2.8　辅助工具 Tools

在树形菜单中的辅助工具项 Tools 中，包括很多辅助工具，如图 2-115 所示。以下讲述几项重要功能。

2.8.1　Annotations

通过 Annotations 可以实现视图区 Logo 图标的透明度设置、计算时间显示等功能，如图 2-116 所示。选择[Tools] > [Annotations] > [Logo]，将图 2-117 属性栏中 Opacity 项的值由 0.2 修改为 1，前后效果对比如图 2-118 和图 2-117 所示。如将 Opacity 项的值改为 0，则取消显示 Logo 图标。

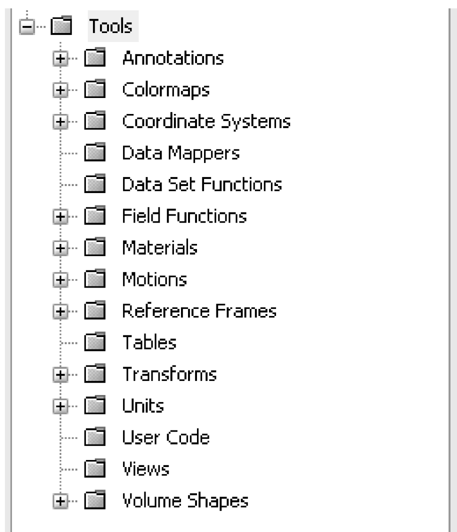


图 2-115　辅助工具 Tools

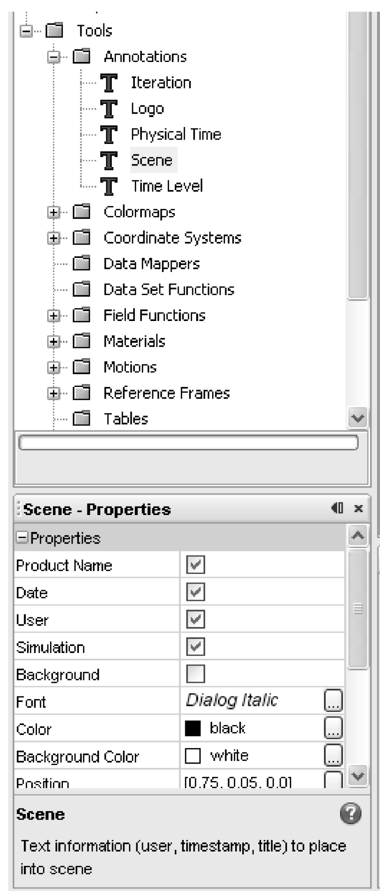


图 2-116　Annotations 选项

Annotations 的其余几项功能将会在第 3 章中讲到。

2.8.2　Coordinate Systems

Coordinate Systems 主要用于帮助用户创建局部坐标系。如图 2-119 所示，右键点击[Tools] > [Coordinate Systems] > [Laboratory] > [Local Coordinate Systems]，选择[New] >

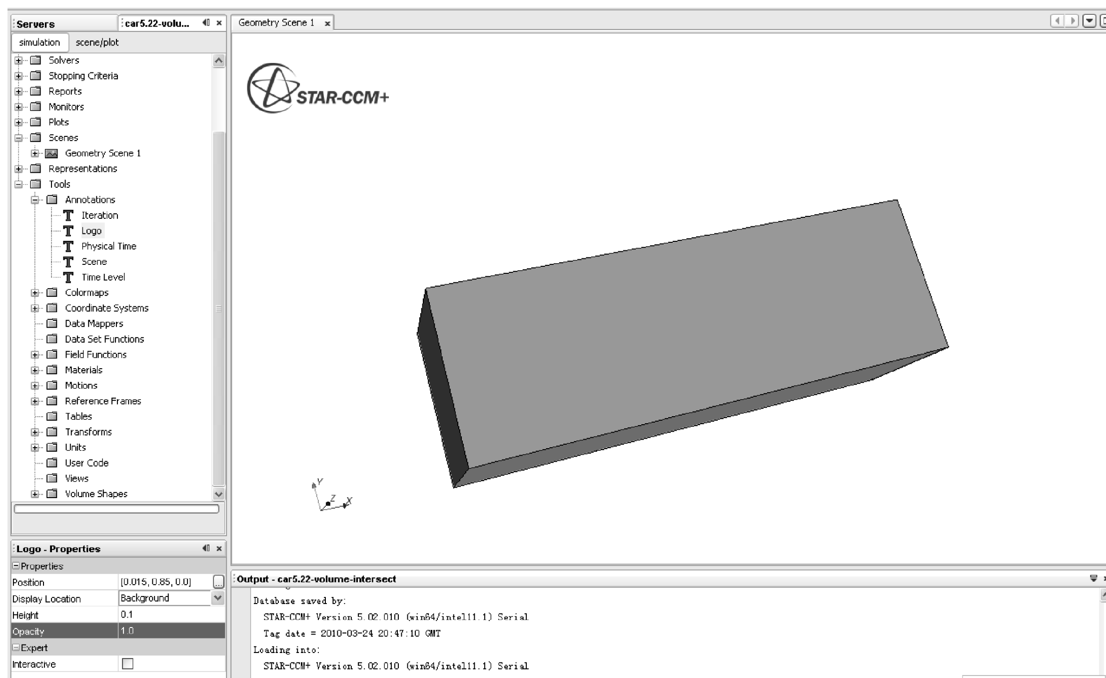


图 2-117 透明度为 1 的 Logo 图标

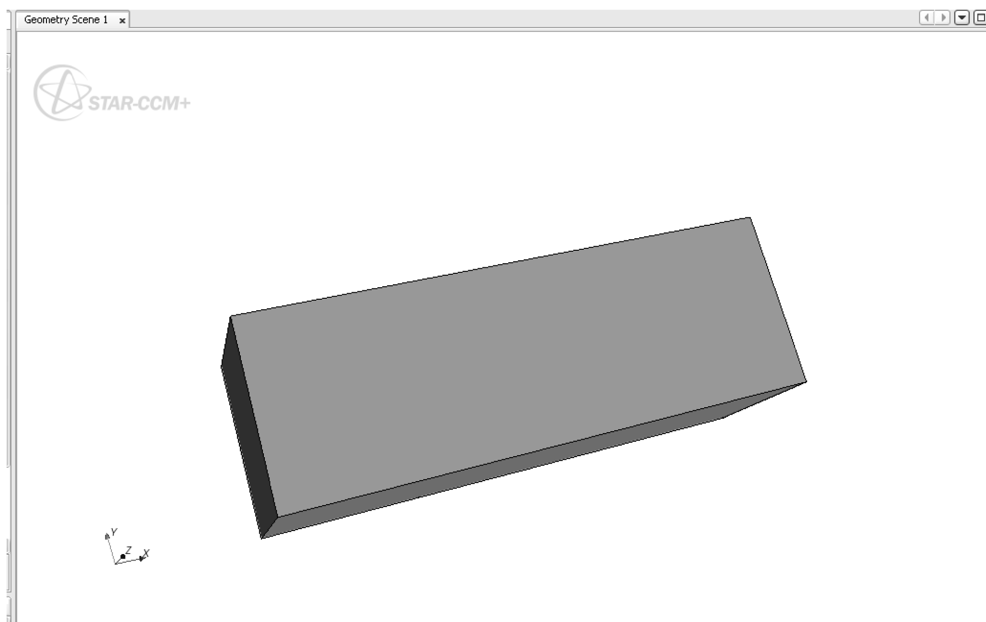


图 2-118 透明度为 0.2 的 Logo 图标

[Cartesian]坐标方式，新建局部坐标系。根据图 2-120 左侧对话框中的设置，可建立位于车体上的局部坐标系。由图 2-119 和图 2-120 可以看出，局部坐标系更便于模型平移、映射等操作。

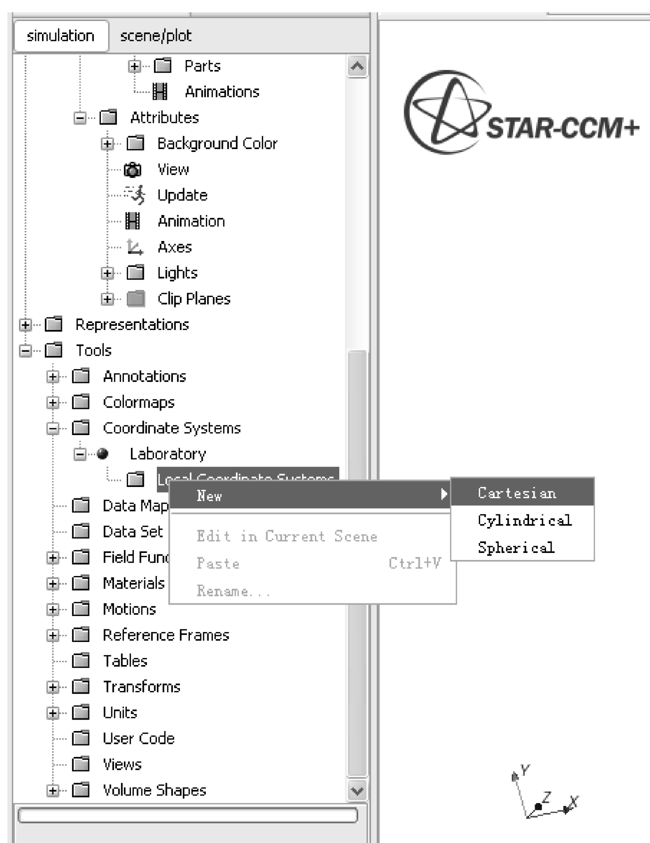


图 2-119　新建 Cartesian 局部坐标系



图 2-120　位于车体上的局部坐标系

2.8.3 Field Functions

Field Functions 的主要函数如图 2-121 所示。Field Functions 有 2 种类型。

① Scalar：温度、压力等标量值。

② Vector：速度、应力等矢量值。

通过右键点击[Tools]>[Field Functions]>[New]，可新建 Field Function，如图 2-122 所示。由图 2-123 可以看到，新建的 Field Function 名称为“User Field Function 1”，通过设置属性栏各项可以定义用户需要的 Field Function。Field Function 的具体操作方法将会在第 3 章中讲到。

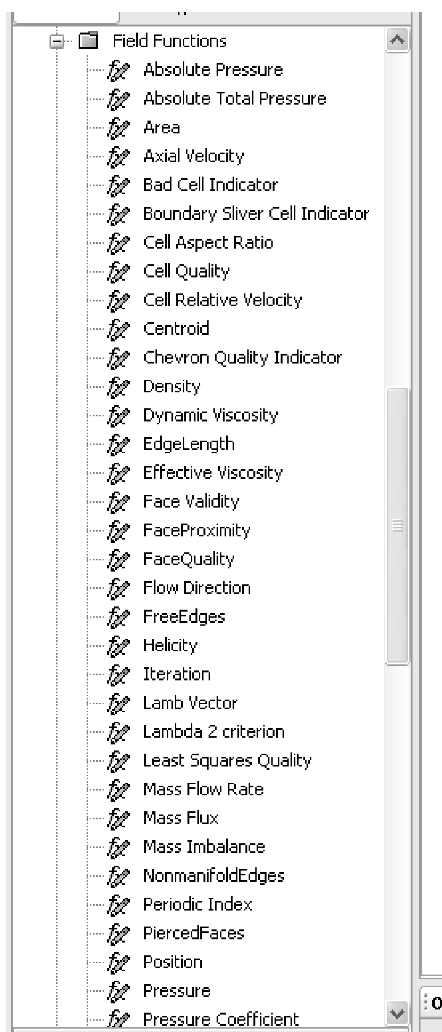


图 2-121 Field Functions 的主要函数

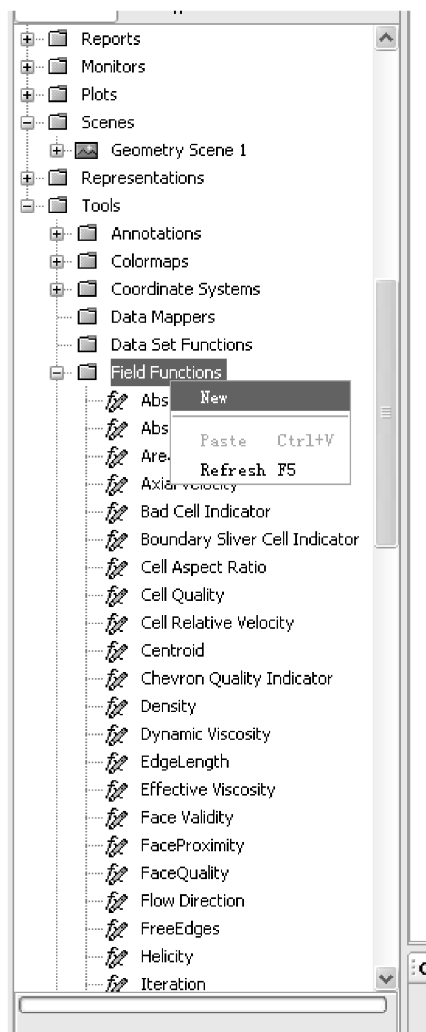


图 2-122 新建 Field Function

2.8.4 Materials

通过 Materials 项可定义和修改气体(Gases)、液体(Liquids)和固体(Solids)三大类型材质的属性，如图 2-124 所示。

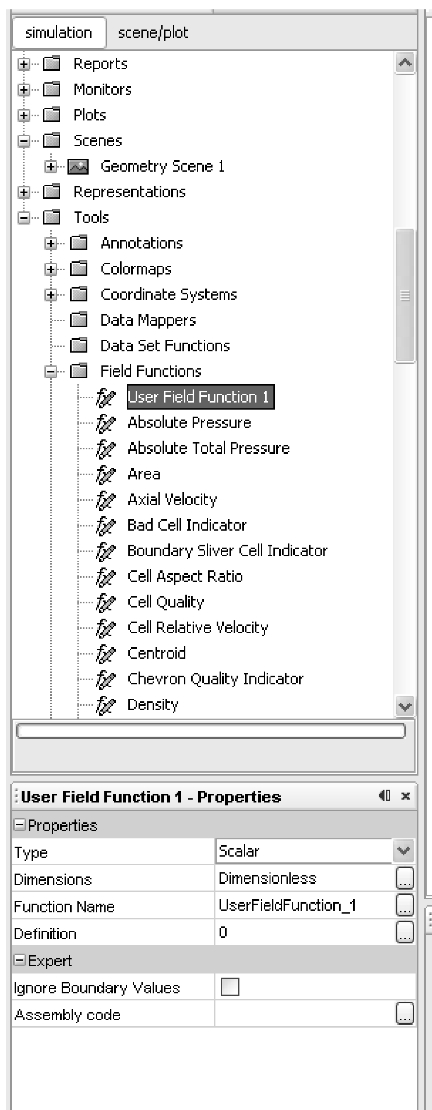


图 2-123 User Field Function 1 选项

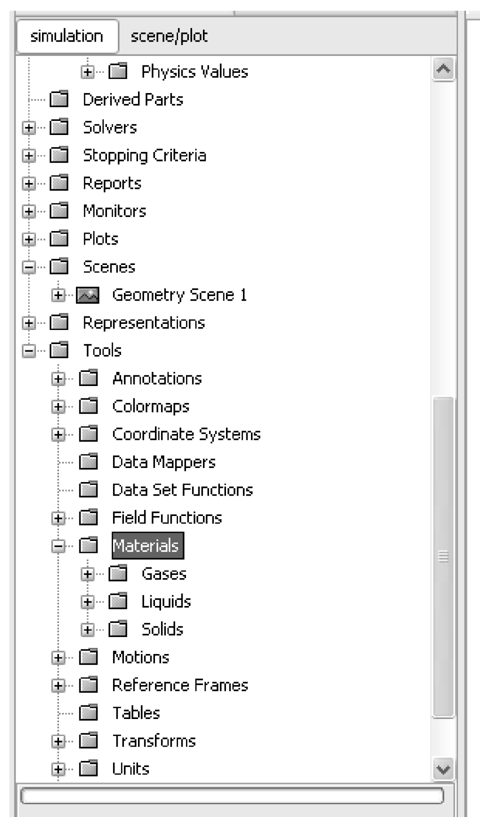


图 2-124 Materials 选项

2.8.5 Motions

通过 Motions 可以设置多种运动方式。如图 2-125 所示，点击[Tools] > [Motions]，右键选择[New] > [Rotation]，即可实现旋转运动。而如果选择[New] > [Rotation and Translation]，则还可以实现平移运动的方式，用于进行列车或汽车交会等情况的计算。

2.8.6 Volume Shapes

通过 Volume Shapes 新建多种形状的加密区。如图 2-126 所示，点击[Tools] > [Volume Shapes]，右键选择[New Shape] > [Block]，即可实现长方体形状的加密区。右键选择[New Shape] > [Cylinder]，即可实现圆柱体形状的加密区。

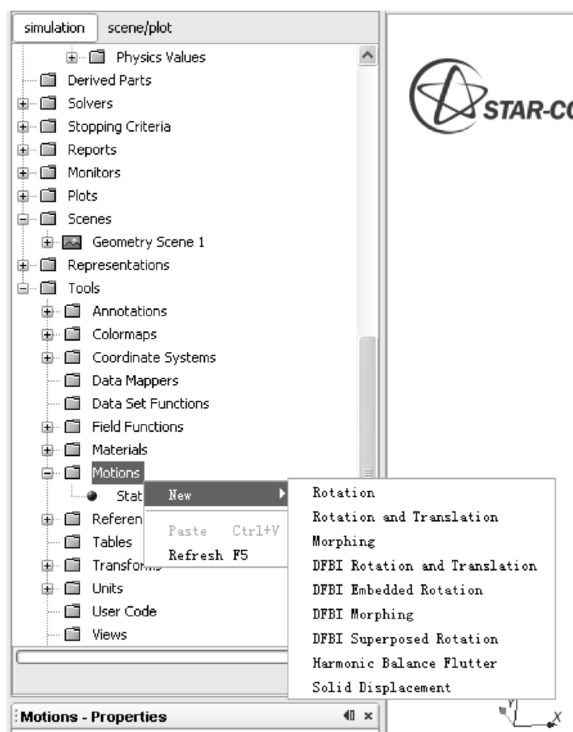


图 2-125　Motions 选项

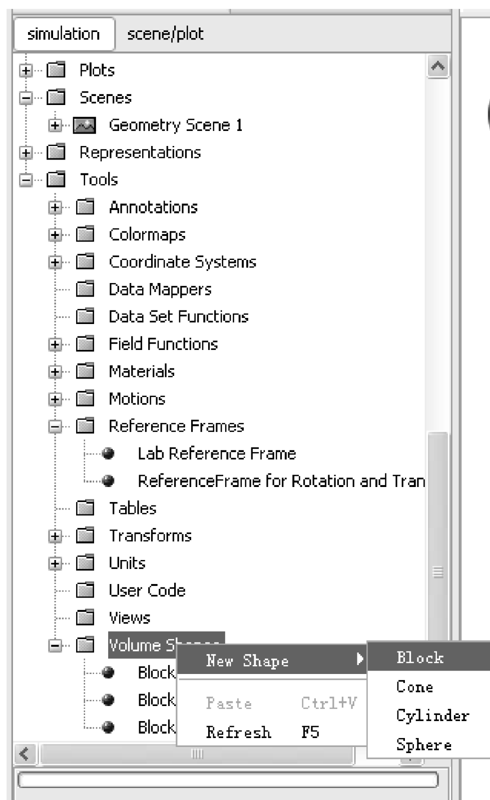


图 2-126　Volume Shapes 选项

第 3 章　散热器的流固耦合换热模拟

散热器模型如图 3-1 所示。

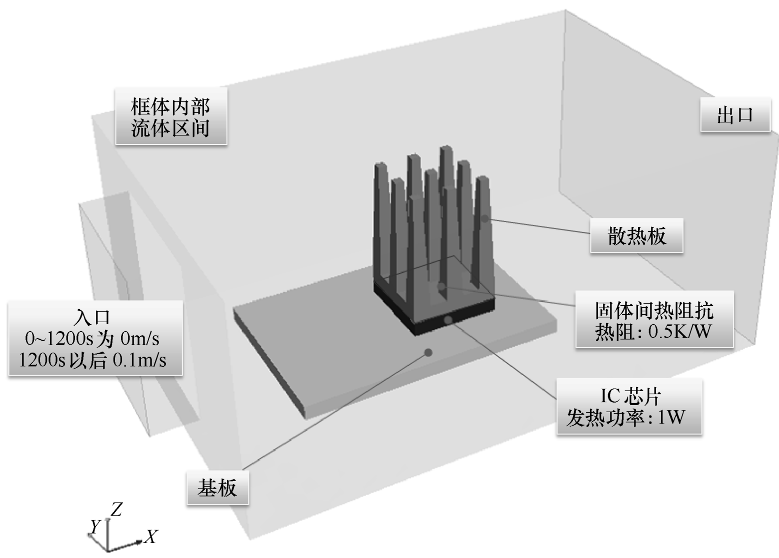


图 3-1　散热器模型示意图

空气、IC 芯片(硅)、基板、散热元件(铝)的物性参数如表 3-1 所示。

表 3-1　空气、IC 芯片(硅)、基板、散热元件(铝)的物性参数

	密度/(kg/m^3)	粘性系数/Pa·s	比热/[J/(kg·K)]	热传导率/[W/(m·K)]	发热量/W
空气	1.184	1.81×10^{-5}	1003.62	0.02637	
IC 芯片(硅)	2330		713.473	148	1.0
基板	1999		1256	0.2594	
散热元件(铝)	2702		903	237	

注：固体的物性参数，使用用户自定义的数据。

模型尺寸如图 3-2 所示。

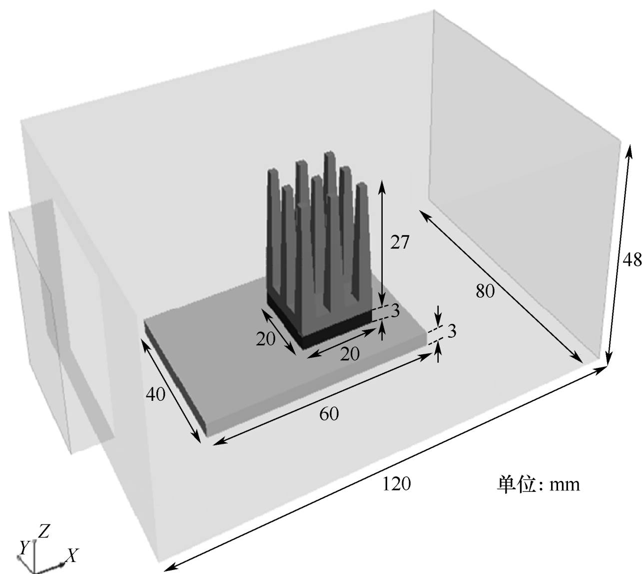


图 3-2 散热器模型的尺寸示意图

3.1 建立计算模型

3.1.1 新建计算模型

启动 STAR-CCM +，点击主菜单[File] > [New Simulation...]，如图 3-3 所示。

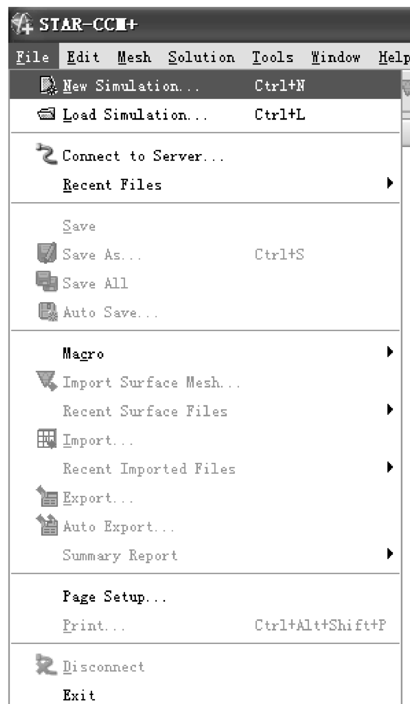


图 3-3 新建项目菜单

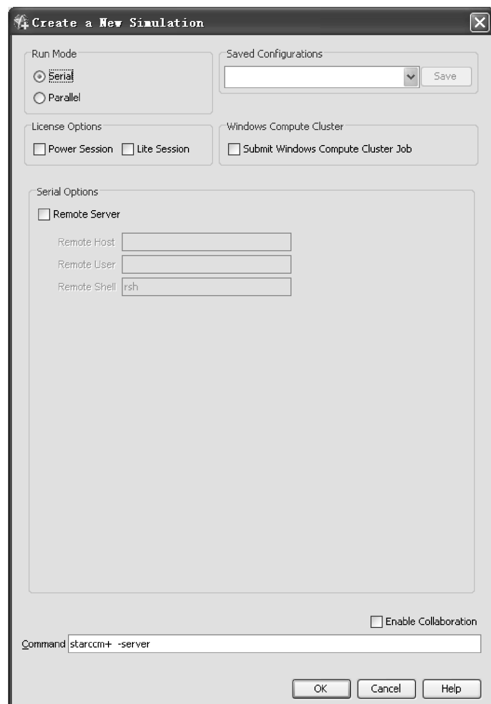


图 3-4 选择 Serial 方式

在“Create a New Simulation”对话框中，选择“Serial”方式，进行单 CPU 运行模式，如图 3-4 所示。点击“OK”按钮确认操作。

导入全部模型的表面数据文件。点击菜单栏[File] > [Import Surface Mesh...]，如图 3-5 所示。也可点击工具栏按钮，如图 3-6 所示，在弹出的“打开”对话框中，选中图 3-6 中的四个“.stl”文件，点击“打开”按钮导入所有文件。

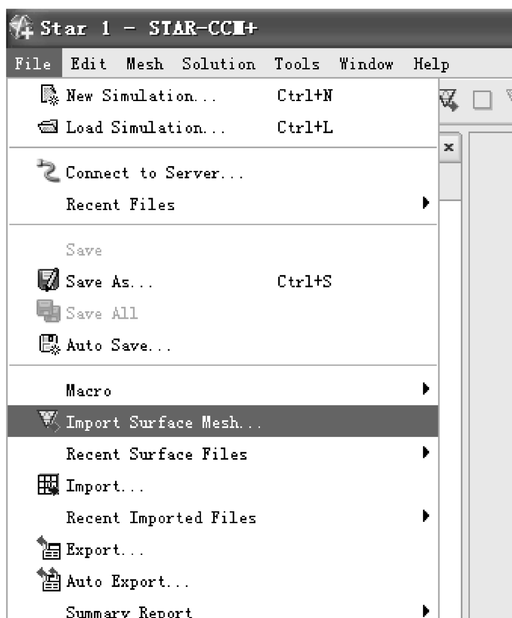


图 3-5　面网格导入的菜单项

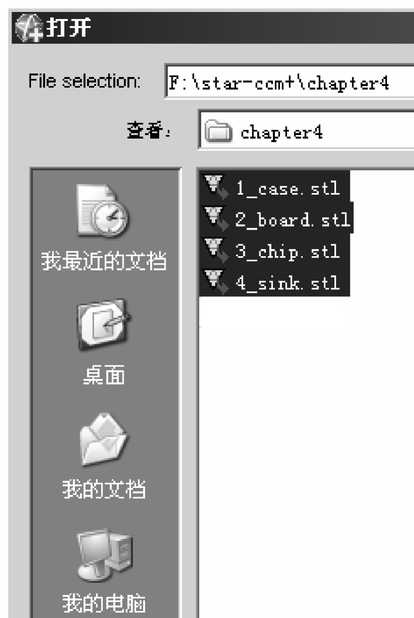


图 3-6　全选模型文件

在弹出的“Import surface option”对话框中，在“Units”项选择 mm 为单位，如图 3-7 所示。点击“OK”按钮确认操作。

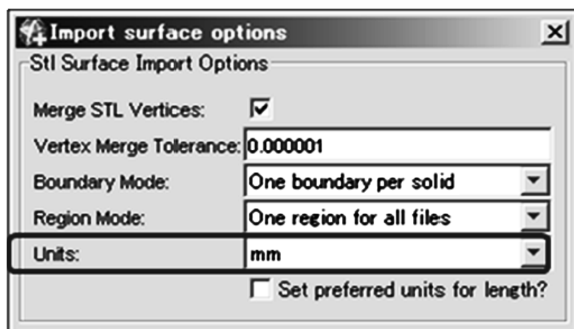


图 3-7　Import surface option 对话框

确认输入网格。点击[Scenes] > [Geometry Scene 1] > [Geometry 1]，在属性栏窗口中勾选“Mesh”项。流体和固体域各自的表面网格显示在视图窗口中，如图 3-8 所示。

3.1.2　选择网格模型

由于导入的 4 个几何文件不存在错配交叉等问题，故不需要修补几何。本例不使用

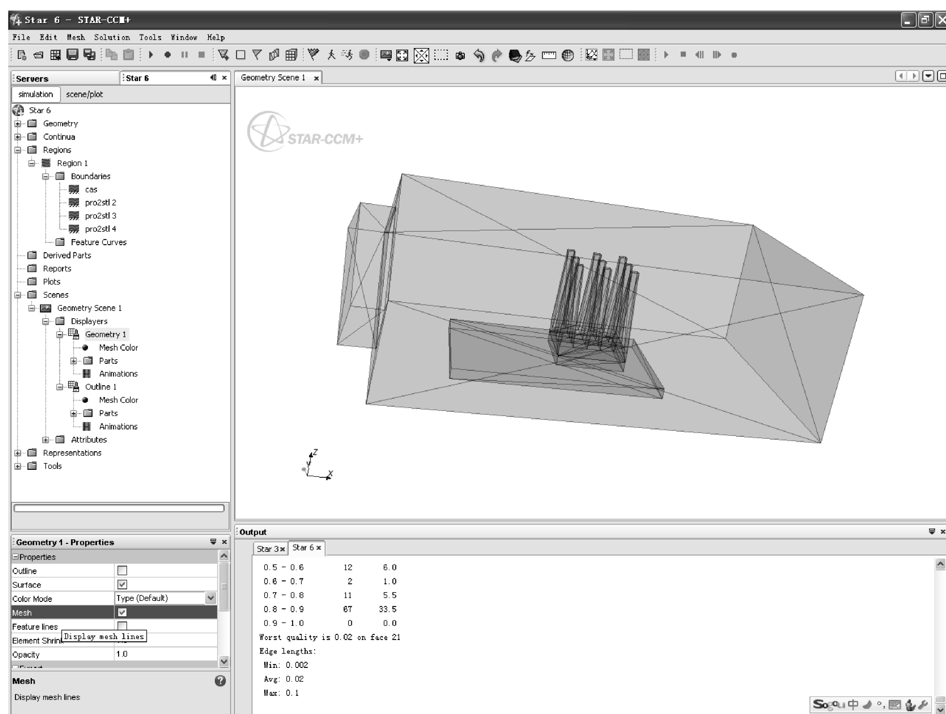


图 3-8 流体和固体域的表面网格

“Surface Wrapper”工具。网格处理思路如图 3-9 所示。

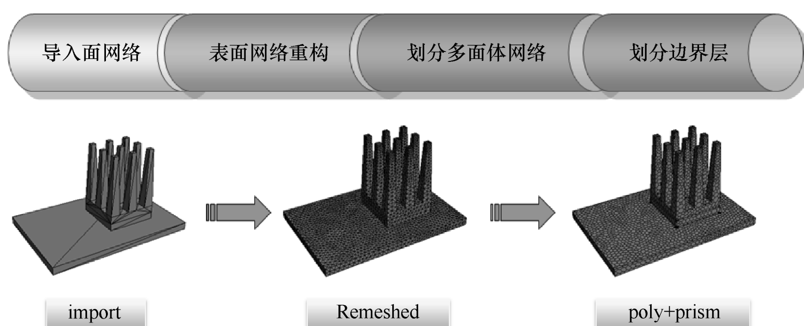


图 3-9 网格处理思路

因为表面数据导入之后流体和固体部分的 Region 没有分开，故在 Remesher 之前应先分割好区域和边界。

选择网格模型。右键点击[Continua]>[Mesh 1]，选择[Select Meshing Models...]，如图 3-10 所示。

也可以双击树形菜单[Continua]>[Mesh 1]>[Models]，打开“Meshing Model Selection”对话框，如图 3-11 所示。

依次选择[Surface Mesh]>[Surface Remesher]、[Volume Mesh]>[Polyhedral Mesher]和[Optional Meshing models]>[Prism Layer Mesher]。选择后的模型被追加到右侧的[Enabled Meshing Models]，如图 3-12 所示。

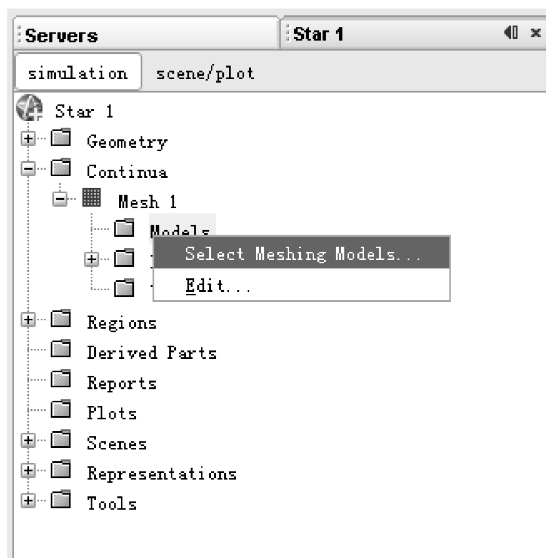


图 3-10　打开网格划分模型选择对话框



图 3-11　选择网格划分模型

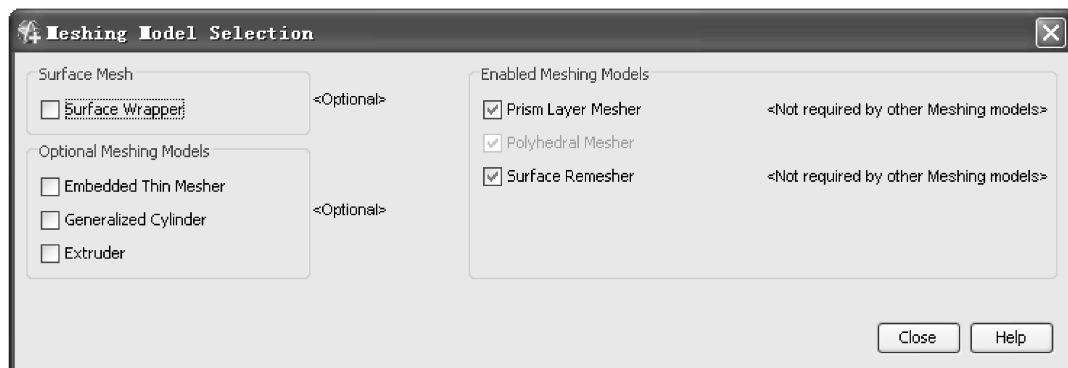


图 3-12　已选模型

确认设定后，点击“Close”按钮退出。

3.1.3 网格参数设定

为了选择合适的基本尺寸，先测量入口长度。

选择合适的视角，放大显示入口。点击工具栏按钮▭。单击选择两点，测量模型入口宽度。如图3-13所示，入口长度为0.0309。本文选择入口宽度的1/5(即6mm)作为基本尺寸。

设定网格基本尺寸和边界层厚度。如图3-14所示，点击树形模拟管理窗口中的[Continua]>[Mesh 1]>[Reference Values]>[Base Size]。

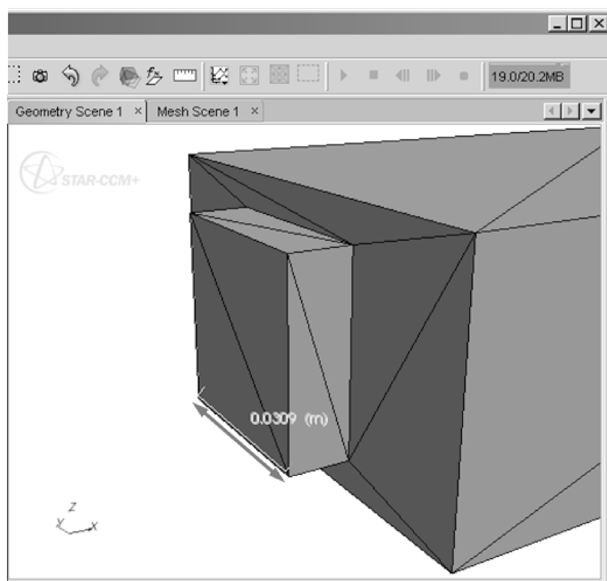


图3-13 入口长度

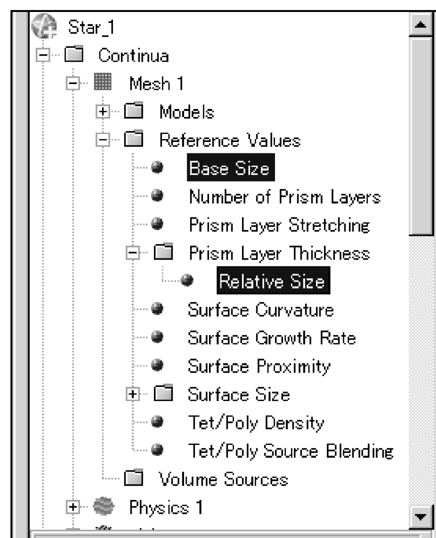


图3-14 网格参数设定

在图3-15的属性栏“Value”项输入：6.0mm。

如图3-14所示，点击树形菜单中的[Continua]>[Mesh 1]>[Reference Values]>[Prism Layer Thickness]>[Relative Size]。在图3-16的属性栏“Percentage of Base”项输入：15.0。

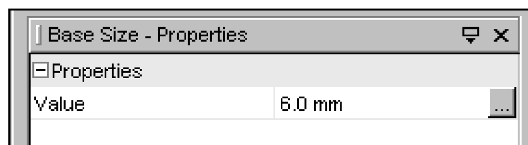


图3-15 Base Size尺寸



图3-16 边界层总厚度

边界层设置采用默认设置：层数设为2(图3-17)，增长比设为1.5(图3-18)。

输入数值后按“Enter”键确定。注意，以上长度数值单位为mm。

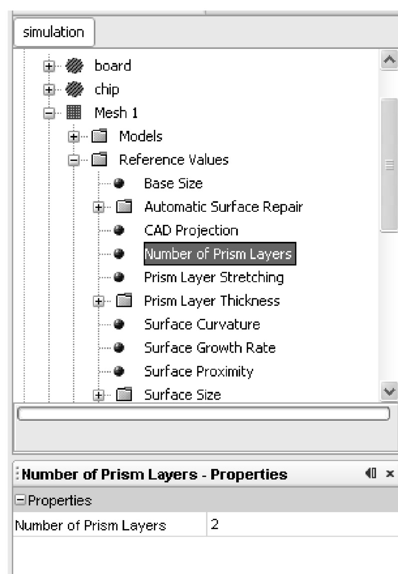


图 3-17　边界层数目

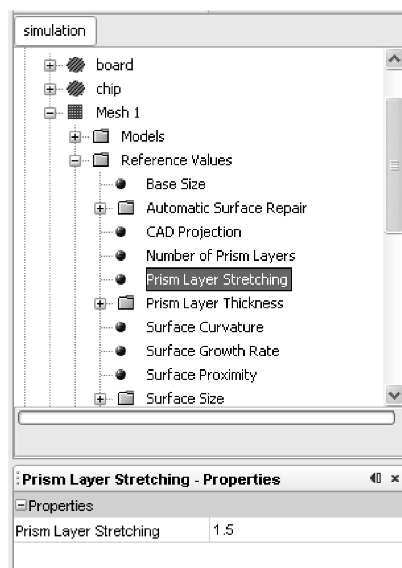


图 3-18　边界层增长比

3.2　流固物理模型设定

3.2.1　流体物理模型设定

1. 计算模型设定

右键选择[Continua] > [New] > [Physics Continuum]，如图 3-19 所示。

右键选择[Continua] > [Physics 1] > [Select models...]，如图 3-20 所示。打开“Physics Model Selection”对话框，如图 3-21 所示。

依次选择[Space] > [Three Dimensional]、[Time] > [Implicit Unsteady]、[Material] >

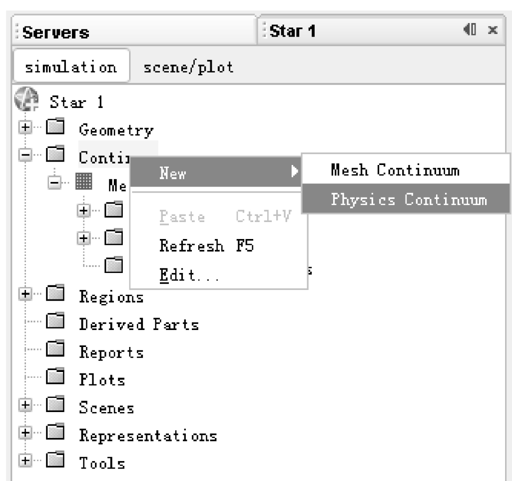


图 3-19　新建 Physics Continuum

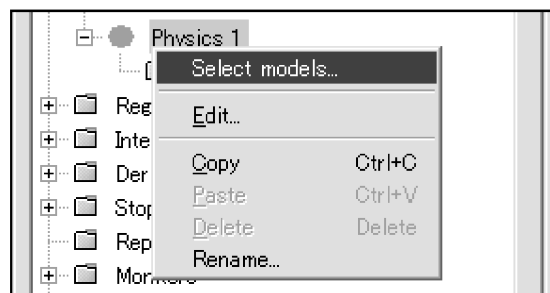


图 3-20　选择物理模型

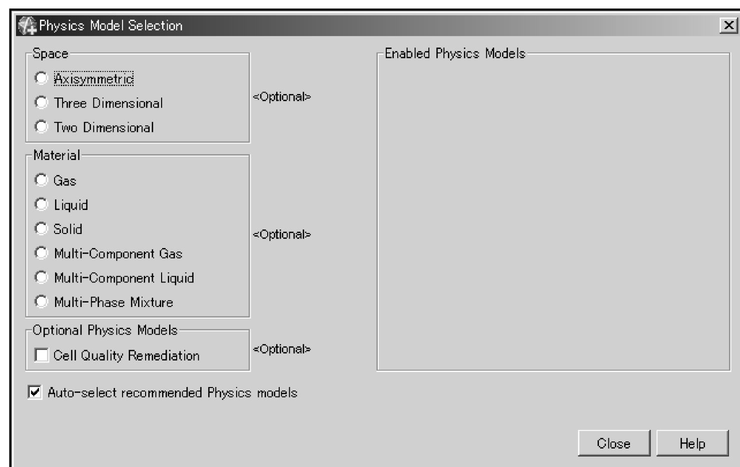


图 3-21　物理模型选择面板

[Gas]、[Flow] > [Segregated Flow]、[Equation of State] > [Constant Density]、[Viscous Regime] > [Turbulent]、[Turbulence] > [K-Epsilon Turbulence] 和 [Optional Physics models] > [Segregated Fluid Temperature]。选择后的模型均被追加到右侧的 [Enabled Physics models] 中，如图 3-22 所示。

确认设定，点击“Close”按钮退出。

注意：通常情况下的热计算，选择 Segregated Fluid Temperature。在包含了燃烧等化学反

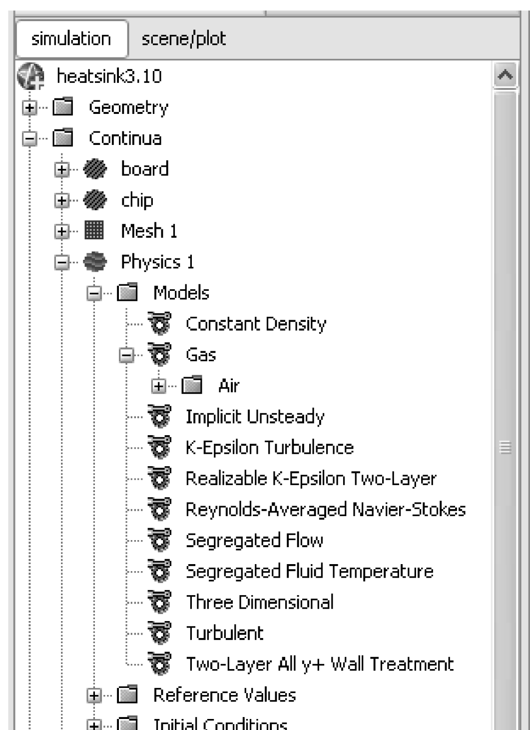


图 3-22　已选的流体物理模型

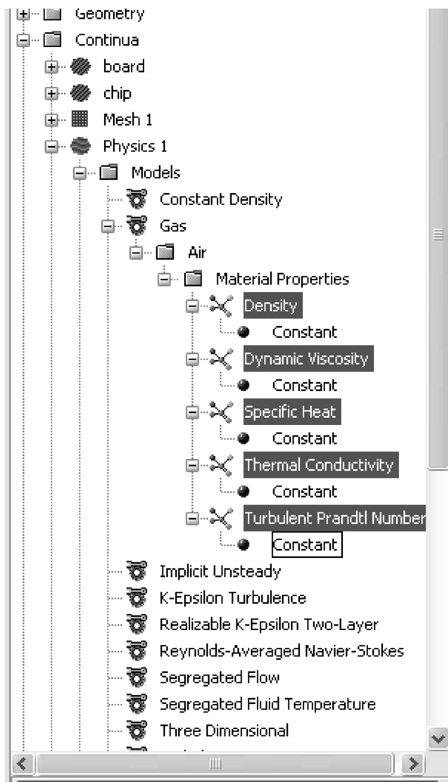


图 3-23　流体物性设定

应计算的情况下，选择 Segregated Fluid Enthalpy。

2. 流体物性设定

选择[Physics 1]>[Models]>[Gas]>[Air]，如图 3-23 所示。此处可以更改流体的密度、粘度系数、比热等。本书采用默认值。

3.2.2　固体物理模型设定

1. 计算模型设定

同流体一样，新建 Physics continuum。

右键选择[Continua]>[New]>[Physics Continuum]，可以看到[Continua]>[Physics 2]出现在树形菜单中。按同样操作生成 Physics 3 和 Physics 4，如图 3-24 所示。

右键选择[Continua]>[Physics 2]>[Select models...]。打开"Physics Model Selection"对话框。

计算条件设定。依次选择[Space]>[Three Dimensional]、[Material]>[Solid]、[Optional Physics Models]>[Segregated Solid Energy]、[Equation of State]>[Constant Density]和[Time]>[Implicit Unsteady]。选择后的模型被追加到右侧的[Enabled Physics models]中，如图 3-25 所示。

点击"Close"按钮，确认设定。

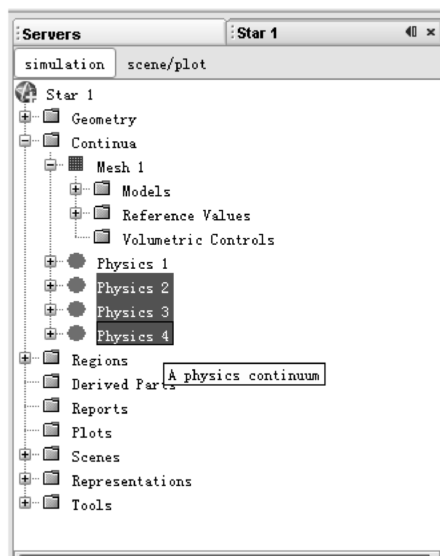


图 3-24　新建三个固体物理模型

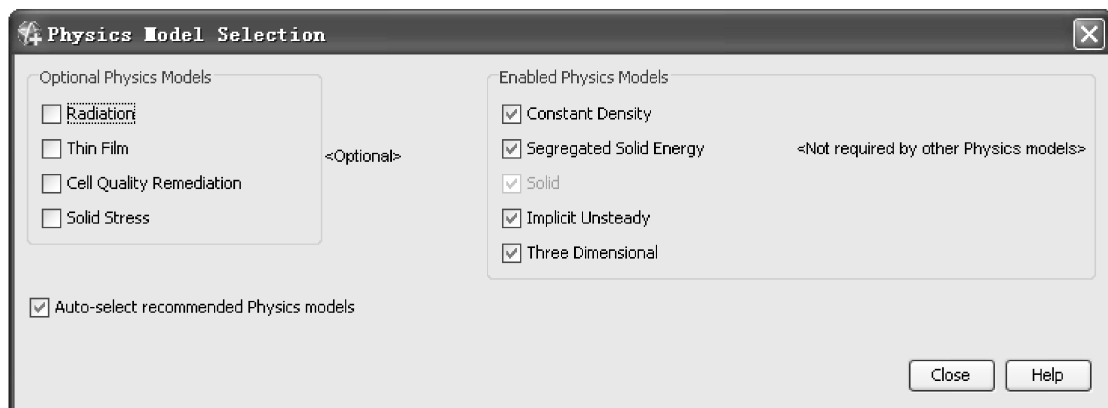


图 3-25　固体物理模型

因为固体物性有 3 个，且设定条件大部分相同，故其他可以直接复制 Physics 2 的设定。复制 Physics 2 的设定，然后粘贴到 Physics 3 和 Physics 4 中，如图 3-26 和图 3-27 所示。

复制 & 粘贴方式可以用在不同模拟类型中。例如：用相同的计算方法求解不同材质的模型，就可通过复制 & 粘贴方式快速完成不同模型的设定，而不需重复设定。

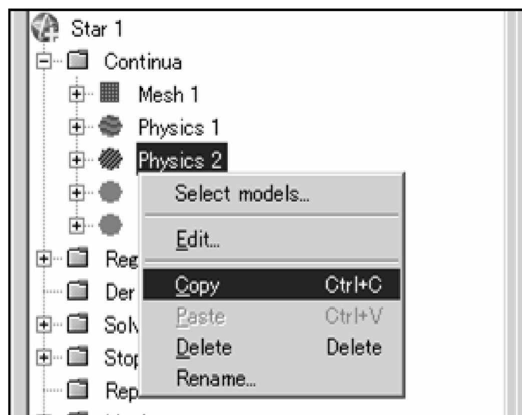


图 3-26　复制 Physics 2 的设定

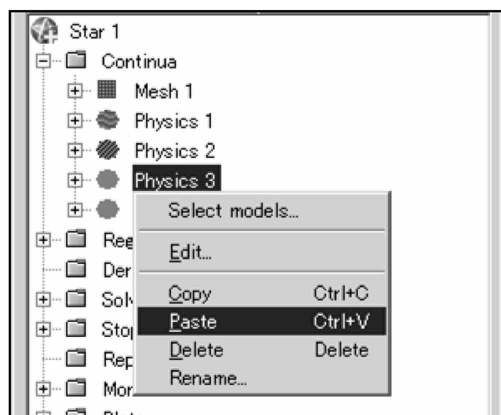


图 3-27　粘贴 Physics 2 的设定

2. 固体物性设定

将[Physics 2]重命名为[board]。右键点击[Continua] > [board] > [Models] > [Solid] > [Al]。如图 3-28 所示，选择[_AddProp_Garaepo]，更改为 garaepo 的物性。

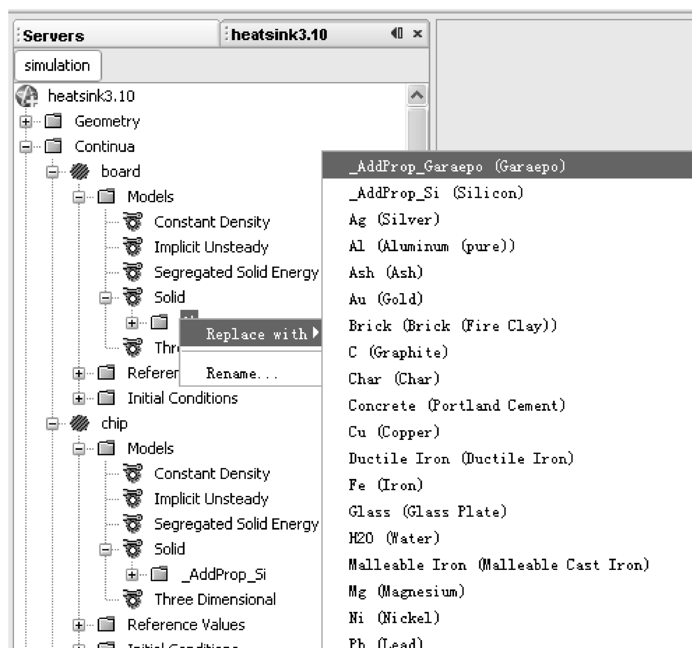


图 3-28　更改固体材质

操作中会弹出图 3-29 所示的“Replace Material”对话框。点击“OK”按钮，确认所更换的固体材质。点击“Cancel”按钮，则放弃更改。

更改后的固体材质由 Al 变为 garaepo 的物性，如图 3-30 所示。

将 Physics 3 重命名为“chip”。右键点击[Continua] > [chip] > [Models] > [Solid] > [Al]。如图 3-31 所示，选择[_AddProp_Si]，更改为 Si 的物性。

将 Physics 4 重命名为“sink”。保持[Continua] > [sink] > [Models] > [Solid] > [Al]不变，如图 3-32 所示。

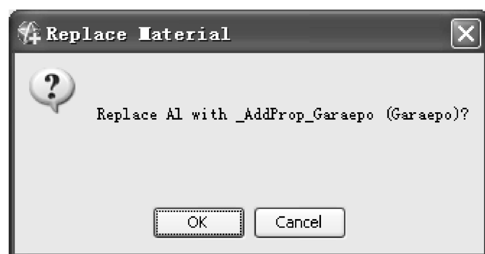


图 3-29　确定更换固体材质

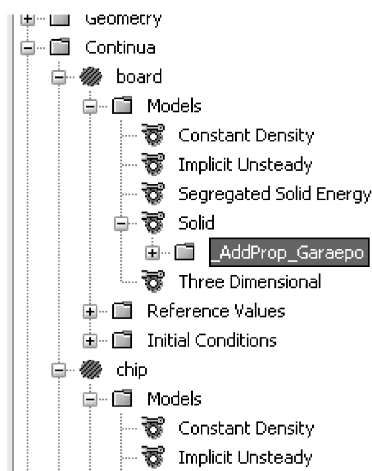


图 3-30　更改后的 board 材质

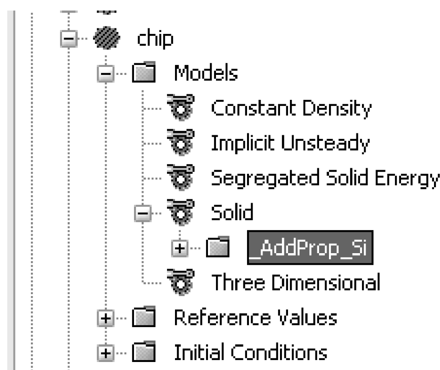


图 3-31　chip 的材质

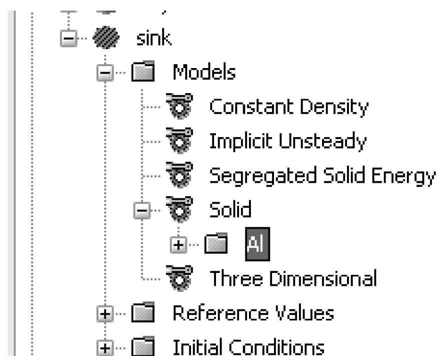


图 3-32　sink 的材质

在 STAR-CCM + 的安装目录下，“props. dbs”为物性的数据库文件(存储路径一般为 C:\Program Files \ CD-adapco \ STAR-CCM + 5. 02. 010)。用户可通过修改文本文件的形式(通过写字板打开)，预先将相关物性参数追加到数据库文件中。

固体(Solid)物性格式为：

FIRST LINE(FORMAT(A20,A60))

Molecular Name、Generic Name(S)

SECOND LINE(FORMAT(4G10. 5))

Reference Temperature(K)，Density(kg/m^3)，Cp(J/kmol)，Thermal Conductivity(W/m · K)

注：气体(VAPOR/GAS)、液体(LIQUID)、props，请参照 dbs 的页眉部分。

比如，硅的物性定义如下：

_AddProp_Si		Silicon(S)	
300.00	2330.00	713.473	148.0
参考温度	密度	比热	热传导率

本章中需在“props. dbs”文件中加入以下四行文字，如图 3-33 所示。

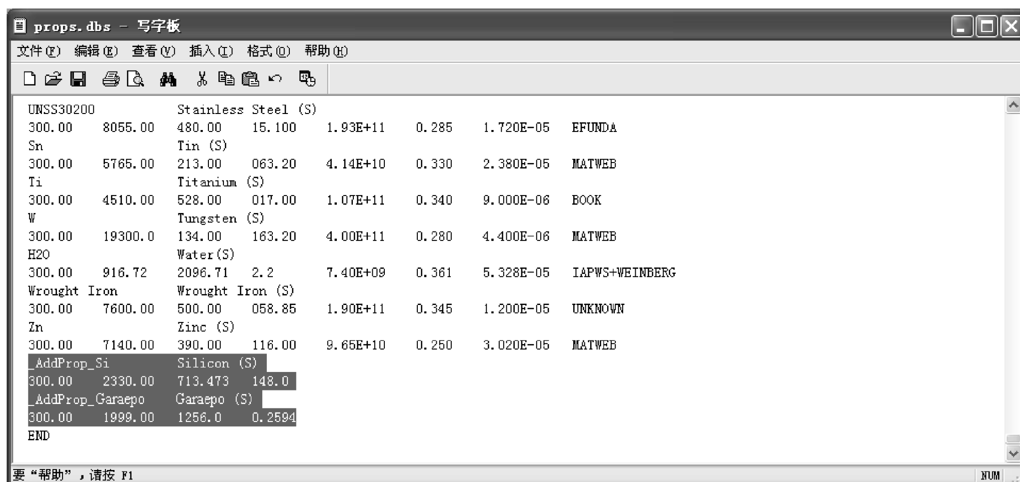


图 3-33 在 props. dbs 中添加固体材质属性

材料物性定义完成后，右键点击[Tools]>[Materials]>[Reload Material Database...]，载入定义的物性参数。

3.2.3 Region 的分割

1. Boundary 相交

由于读入的流体和固体模型同在一个 Region 里面，故需要将 Region 分割。STAR-CCM+可以通过采用"Split by Surface Topology"功能来分割 Region，本算例采用此方法。该功能的操作对象需要连续且只有一个表面。

如图 3-34 所示，基板 board(Boundary1)与芯片 chip(Boundary2)均在 Region 1 里面。在基板、芯片与流体区域分开前，需要将 Region 中重叠的 boundary 进行相交操作。随后网格拓扑被分割，通过该方法可以自动地把 Region1 分开成 Region1(基板和芯片内部)和 Region2(基板和芯片外部)。

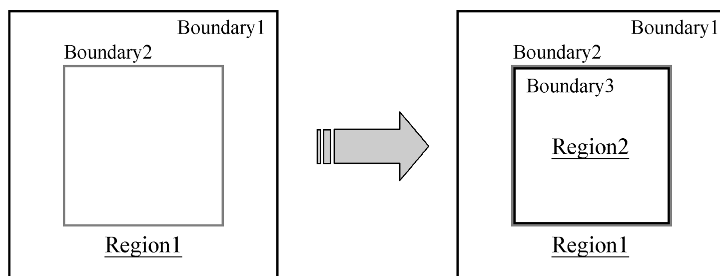


图 3-34 Split by Surface Topology 功能

把 Boundary 上的多重边分割，使网格连续。如图 3-35 所示，选择[Regions]>[Region 1]>[Boundaries]下的全部 Boundaries，右键选择"Intersect"命令，执行相交分割操作。

多重边被节点分割，使得网格连续，如图 3-36 所示。

将各个 Boundary 重命名，如图 3-37 所示。图中四个 Boundary 分别处于选中状态，相对于其他 Boundary 为加浓显示状态。

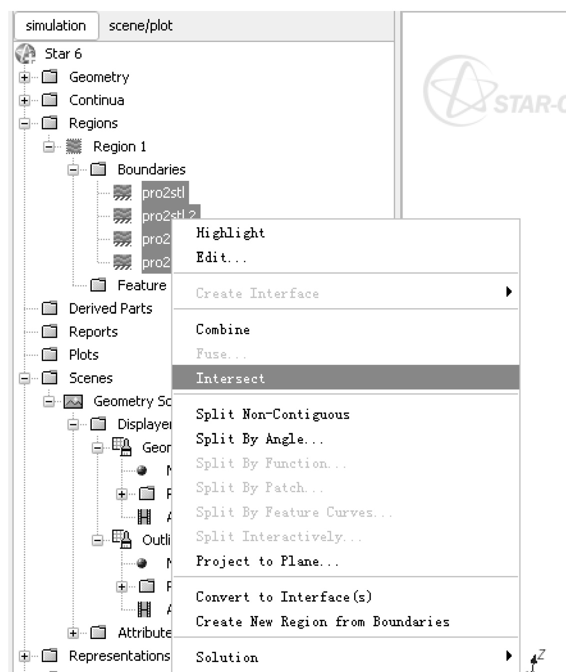


图 3-35　Intersect 操作

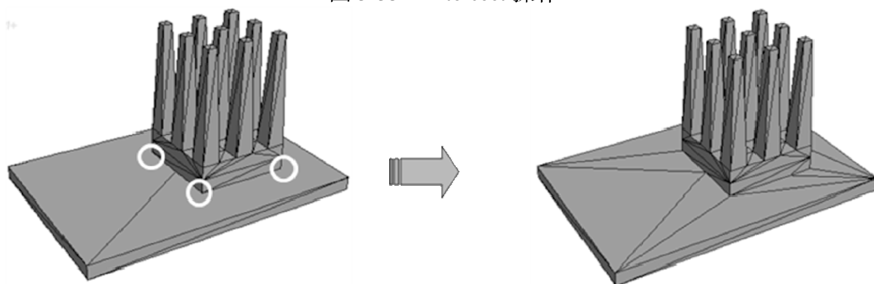


图 3-36　Intersect 前后网格变化

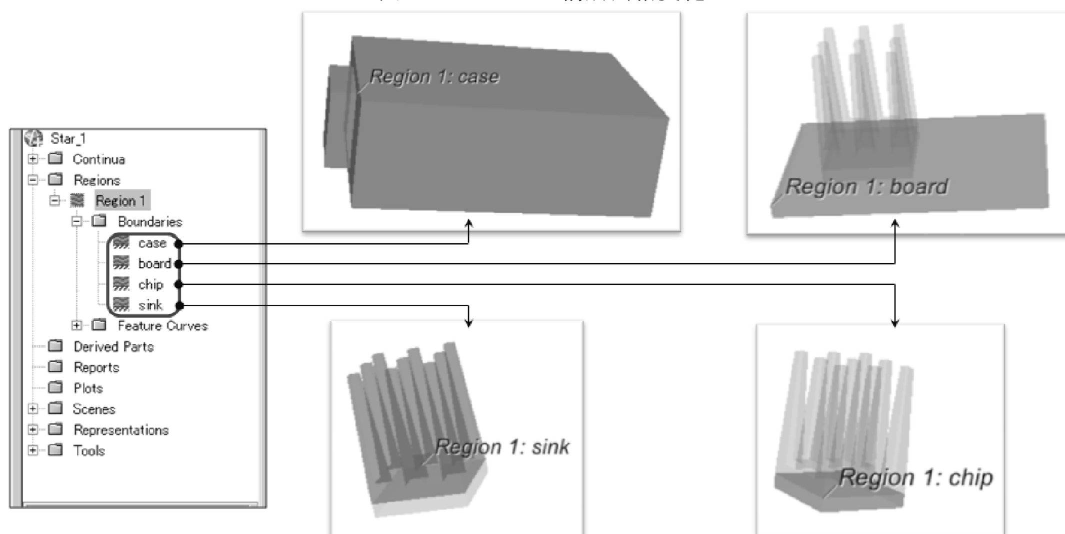


图 3-37　重命名各个 Boundary

2. 删除重叠的 Boundary

右键复选“case”、“board”和“chip”三个边界，选择菜单中的“Split By Angle...”命令，如图 3-38 所示。

在弹出的“Split Boundary by Angle”对话框中，将“Angle(degrees)”项的值设置为 80，如图 3-39 所示。其余设置采用默认值。点击“Apply”按钮确认操作，点击“Close”按钮退出。

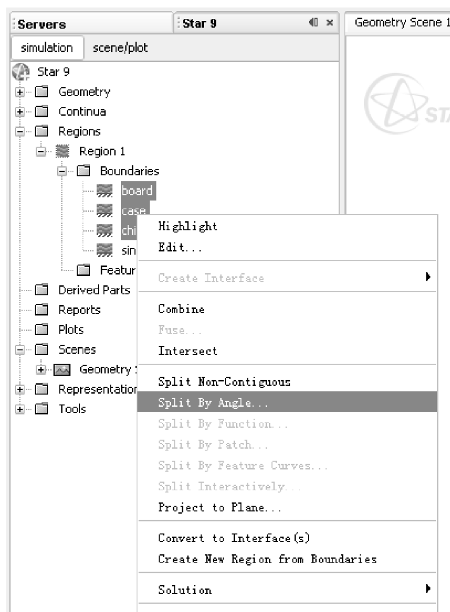


图 3-38　Split By Angle 功能

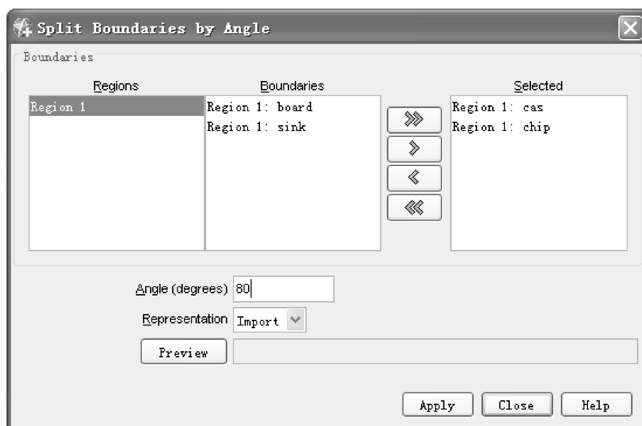


图 3-39　输入角度值

右键选择[Regions]>[Region 1]>[Boundaries]>[Refresh]，按名称重新排序各边界，如图 3-40 所示。

分割流体和固体重合的边界。右键点击[Regions]>[Region 1]>[Boundaries]>[case 11]，选择“Split By Feature Curves”命令，如图 3-41 所示。

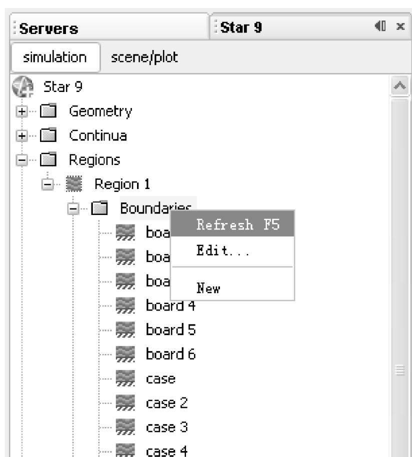


图 3-40　Refresh boundary（重新排序各边界）

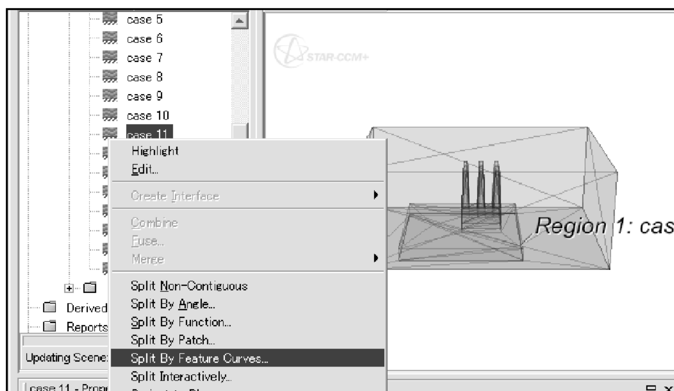


图 3-41　Split By Feature Curves 选项

在“Feature Curves”栏中，追加“Edges from intersection”项到右侧的“Selected”栏中，如图3-42所示。

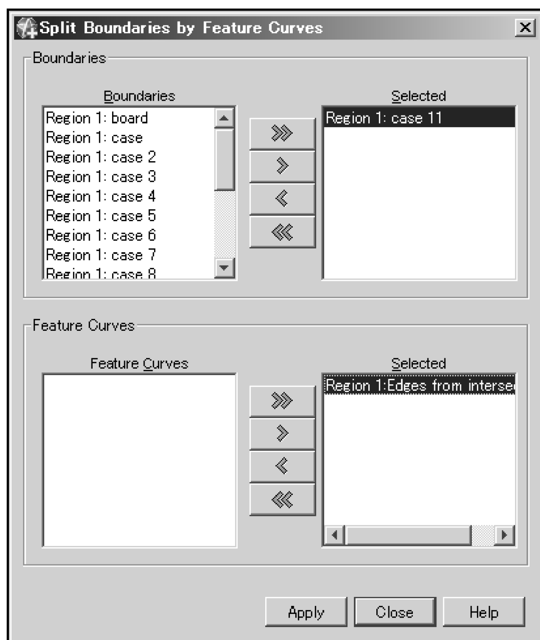


图3-42　追加Edges from intersection项

点击“Apply”按钮确认操作。点击“OK”按钮退出。

在重新分割的Boundary中选择“board 2”、“chip”、“chip 2”，右键点击并选择“Delete”命令，删除这三个边界，如图3-43所示。由于“board 2”和“case11 2”这两个边界重叠，所以只需保留一个边界。

在弹出的对话框中点击“Yes”按钮，确认操作，如图3-44所示。

3.2.4　边界条件设定

1. 进口、出口边界条件

进口设定，将“case _ in”定义为“Velocity Inlet”条件，如图3-45所示。

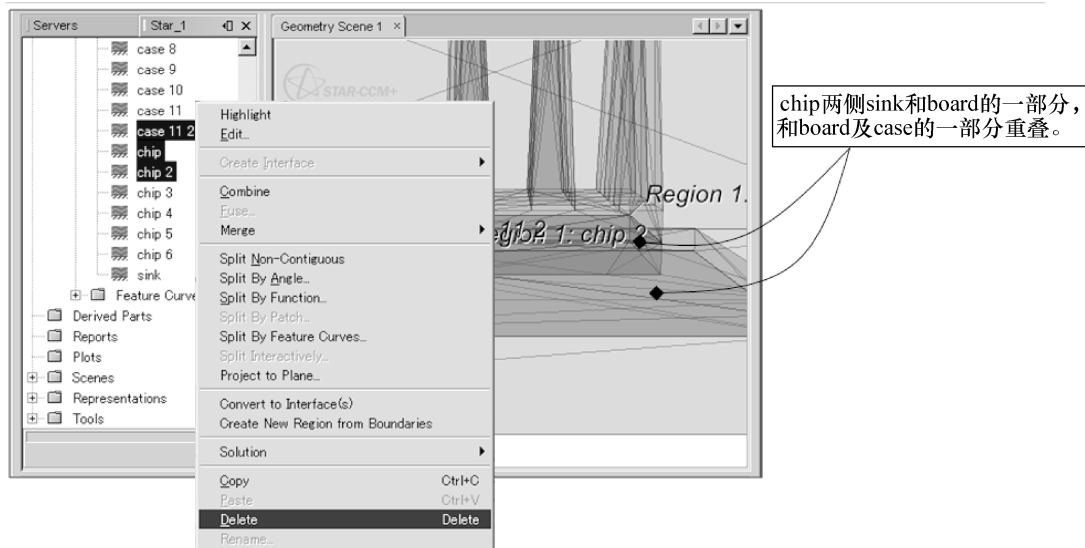


图3-43　删除重复的boundary

出口设定，将“case _ out”定义为“Pressure Outlet”条件，如图3-46所示。



图3-44　确认操作

复选“case _ in”、“case _ out”以外的case边界，右键点击选择“Combine”命令合并，如图3-47所示。将合并后的Boundary改名为“case”。

复选“chip 3”、“chip 4”、“chip 5”

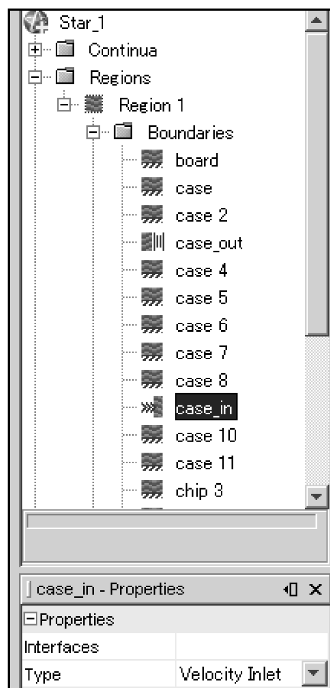


图 3-45　入口设定

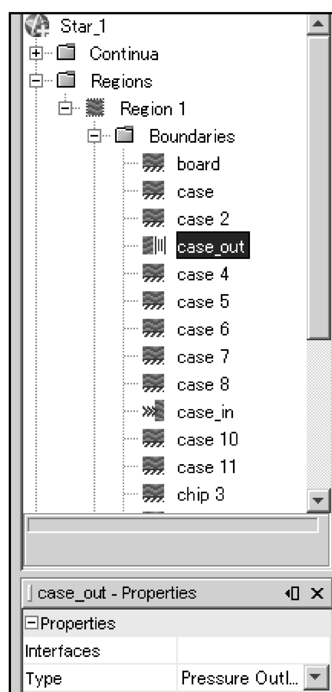


图 3-46　出口设定

和“chip 6”四边界，右键点击选择“Combine”合并，如图 3-48 所示。将合并后的 Boundary 改名为“chip”。

将“board”、“case”、“chip”和“sink”这四个边界设置为“wall”边界条件。

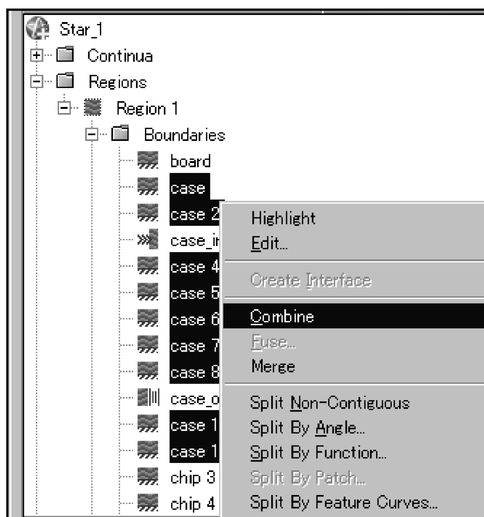


图 3-47　合并 case 边界

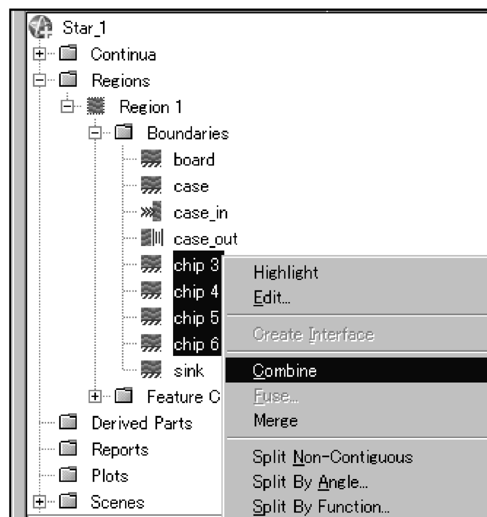


图 3-48　合并 chip 边界

Boundary 合并并进行重命名后的树形菜单如图 3-49 所示。

2. 生成 Feature Curve

在模型边界部分生成特征线。右键点击［Regions］>［Region 1］>［Feature Curves］，选

择[New Feature Curve] > [Mark Edges. . .]，如图 3-50 所示。

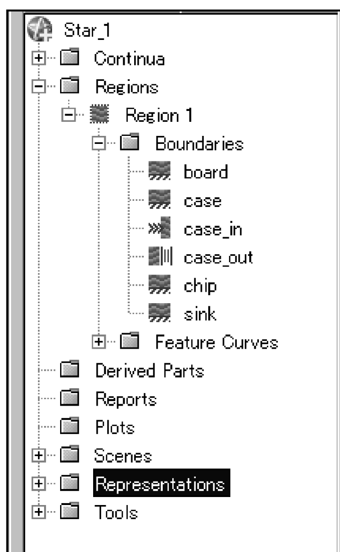


图 3-49　重命名后的树形菜单

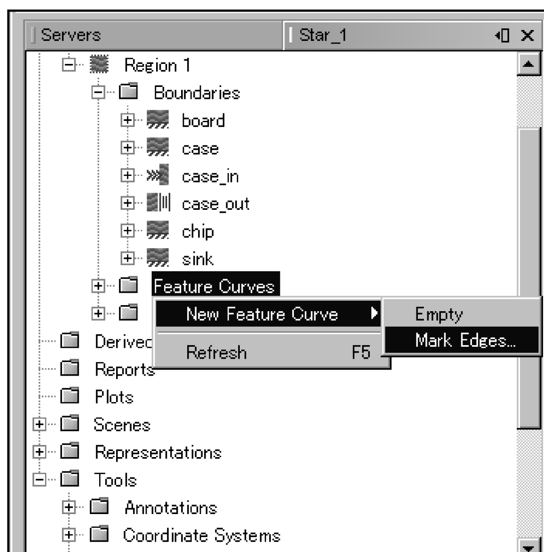


图 3-50　Mark Edges 选项

弹出 “Mark Feature Edge Options” 对话框，如图 3-51 所示。选择全部 Boundary。点击 “Apply” 按钮，生成特征线。点击 “Close” 按钮完成设定。

在不使用 Surface Wrapper 工具的情况下，对于弯曲曲面需要定义特征线，否则边界特征将不能被很好地保持。

Boundary 合并准备完成，开始分割 Region。右键点击[Region 1]，选择[Split by Surface Topology]，如图 3-52 所示。

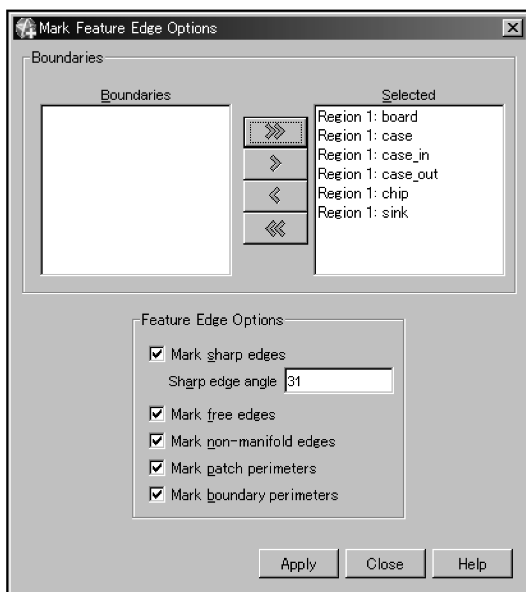


图 3-51　“Mark Feature Edge Options” 对话框

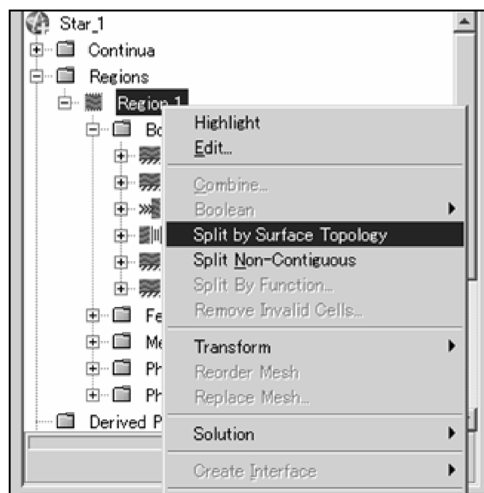


图 3-52　Split by Surface Topology 选项

在弹出的“Split Region Options”对话框中保持默认设置，点击“OK”按钮，确认合并，如图 3-53 所示。



图 3-53 确认合并

3.2.5 Region 模型设定

分割 Region 之后，进行重命名。

右键选择[Continua] > [Physics 1]，复制模型设定条件。右键选择[Regions] > [case]，粘贴物理模型。

采用同样方法对其他三个固体 Region 进行定义。其中各 Region 对应各自的物理模型和材质等。

3.2.6 保存模型

选择[File] > [Save]，输入文件名“heat _ sink. sim”，点击“保存”，确认保存模型操作，如图 3-54 所示。

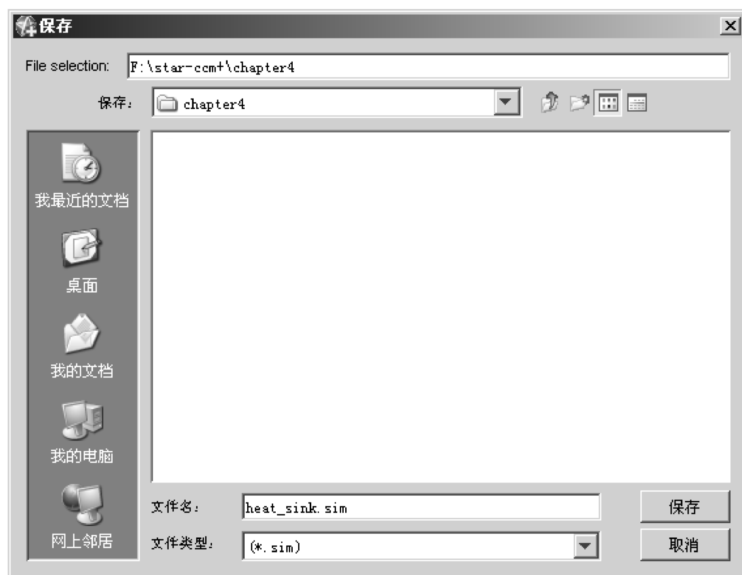


图 3-54 保存文件

3.3 流固耦合换热计算

3.3.1 设置计算条件

1. 设置进口、出口条件

选择[Regions] > [case] > [Boundaries] > [case _ in] > [Physics Conditions] > [Turbulence Specification]，将其属性栏中“Method”项选择为“Intensity + Length Scale”方式，即湍流

强度加涡的尺度的方式，如图3-55所示。

可以看到树形菜单[Regions] > [case] > [Boundaries] > [case _ in] > [Physics Values]中出现“Turbulence Intensity”和“Turbulence Length Scale”两项，如图3-56所示。

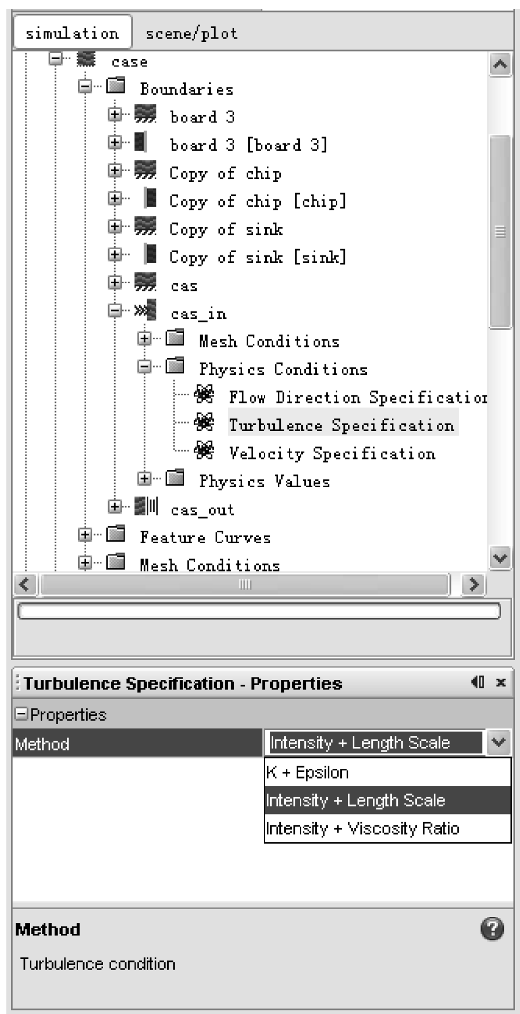


图3-55　湍流设置

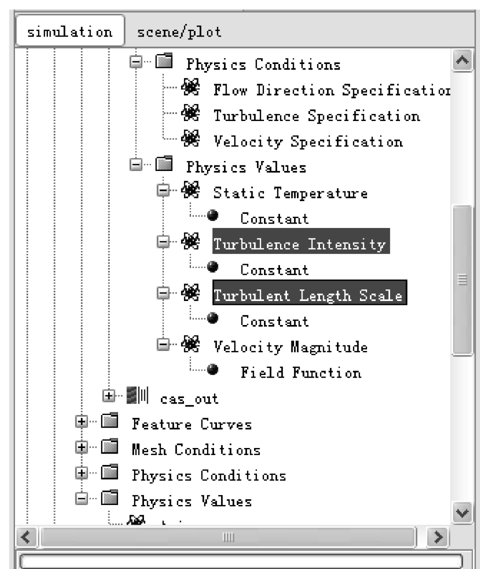


图3-56　湍流条件设置

点击[Regions] > [case] > [Boundaries] > [case _ in] > [Physics Values] > [Turbulence Intensity] > [Constant]。在其属性栏“Value”项中输入0.03，如图3-57所示。

点击[Regions] > [case] > [Boundaries] > [case _ in] > [Physics Values] > [Turbulence Length Scale] > [Constant]。在其属性栏“Value”项中输入0.0030，如图3-58所示。

湍流强度和涡的尺度的设置方法如下。

湍流强度：0.03 ~ 0.1

涡的尺度：

矩形边界条件：4 × 边界条件面积/边界条件周长 × 0.1

圆形边界条件：直径 × 0.1

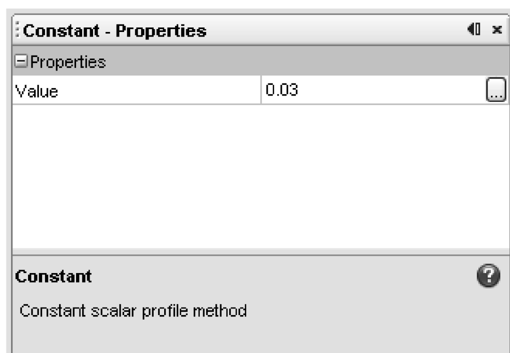


图 3-57　Turbulence Intensity 选项

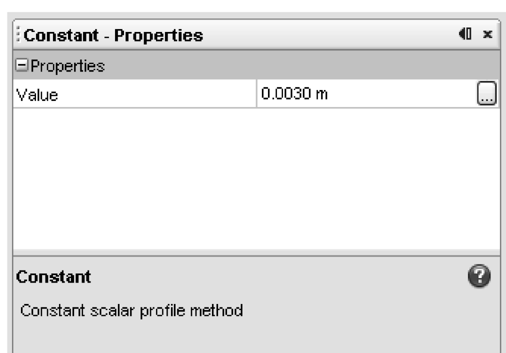


图 3-58　Turbulence Length Scale 选项

该模型的进口边界条件为速度随时间变化的条件关系式。

从计算开始到 1200s 的速度为 0m/s，随后的速度为 0. 1m/s，如图 3-59 所示。

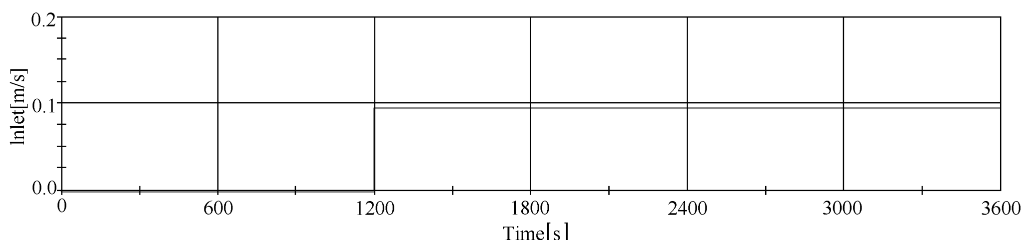


图 3-59　进口速度条件

在 Field Function 中实现从 0 到 1200s 速度为 0，随后速度为 0. 1m/s 的表达式如下：

($ Time < 1200)？ 0∶0. 1

注：具体的语法请参照 Appendix。

Field Function 是 STAR-CCM + 自带的功能，除了可以用来定义边界条件，也可以定义初始条件、物性值、后处理结果等。

生成速度随时间变化的函数的 Field Function。右键点击[Tools] > [Field Function]，选择[New]，如图 3-60 所示。

点击新生成的[User Field Function 1]，如图 3-61 所示。在 Definition 项中，输入表达式“($ Time < 1200)？ 0∶0. 1”。

点击[Dimensions]的[...]按钮。如图 3-62 所示，在“Length”项中输入 1，在“Time”项中输入“ – 1”。因为是速度变量所以量纲为[Length/Time]。

在[Tools] > [Field Function] > [User Field Function 1]属性栏的“Definition”项中输入“($ Time < 1200)？ 0∶0. 1”。

用做好的 Field Function 设置入口边界条件。如图 3-63 所示，选择[Regions] > [case] > [Boundaries] > [case _ in] > [Physics Values] > [Velocity Magnitude]。如图 3-64 所示，把属性栏中的“Method”项变更为“Field Function”。选择“Velocity Magnitude”属性栏“Method”项中的“Field Function”，如图 3-65 所示，在随后出现的“Scalar Function”项中选择“User Field Function 1”。

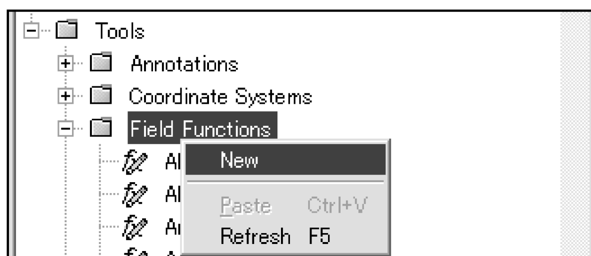


图 3-60　新建 Field Functions

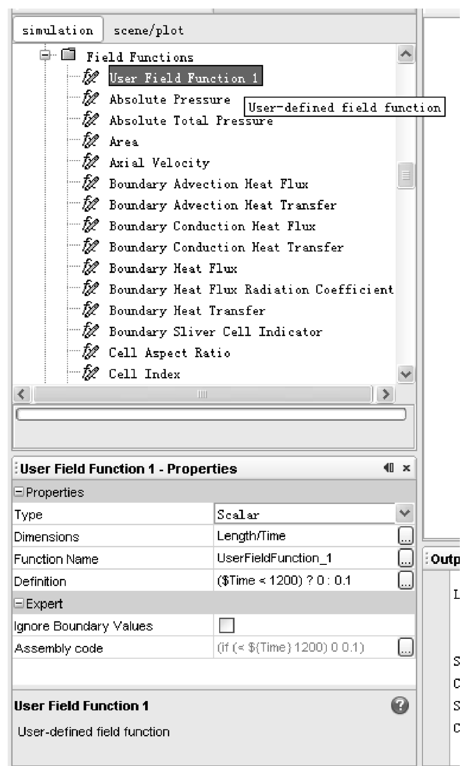


图 3-61　生成 User Field Function 1

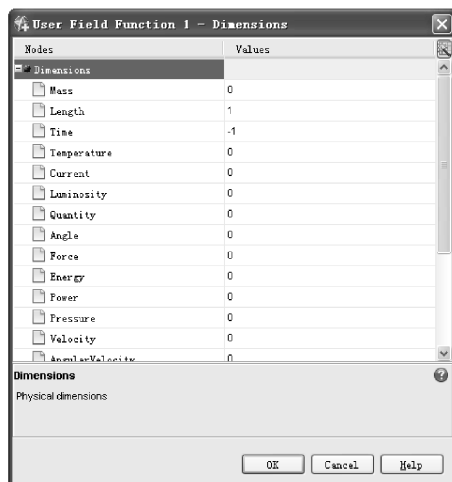


图 3-62　User Field Function 1 对话框

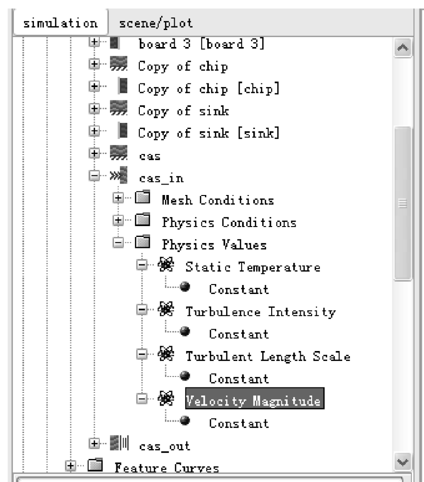


图 3-63　Velocity Magnitude 选项

设定 Pressure Outlet 的压力边界条件：

点击[Regions] > [case] > [Boundaries] > [case_out] > [Physics Values] > [Static Pressure] > [Constant]。确认属性栏中的“Value”项为[0.0 Pa]，如图 3-66 所示。

点击[Regions] > [case] > [Boundaries] > [case_out] > [Physics Conditions]，将“turbulence specification”等项采用与 case_in 相同的设置。

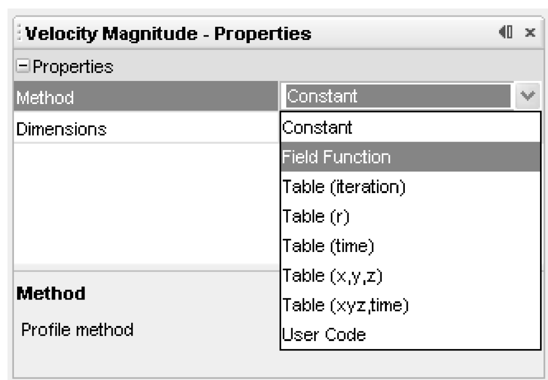


图 3-64 Method：Field Function 选项

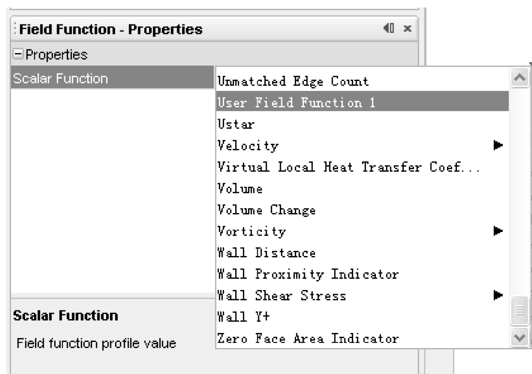


图 3-65 Field Function：User Field Function 1 选项

2. 固体热源条件设定

固体热源条件设定应考虑 IC 芯片的发热条件。STAR-CCM + 使用的发热量为单位体积的发热量，所以要对应转换单位。

点击[Regions] > [chip] > [Physics Conditions] > [Energy Source Option]，设置能量选项，如图 3-67 所示。

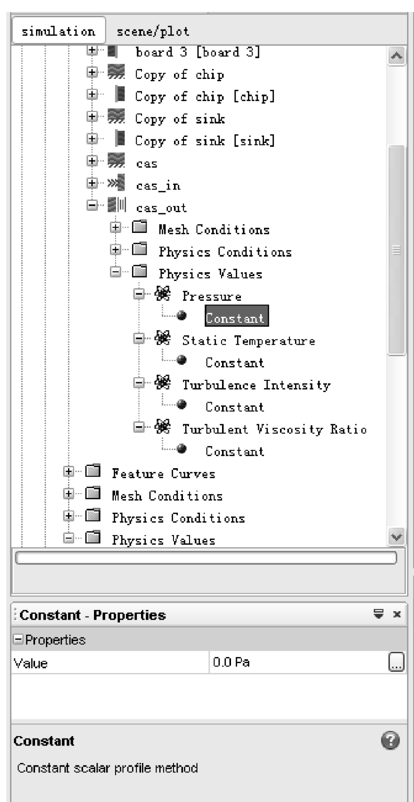


图 3-66 Pressure 值设定

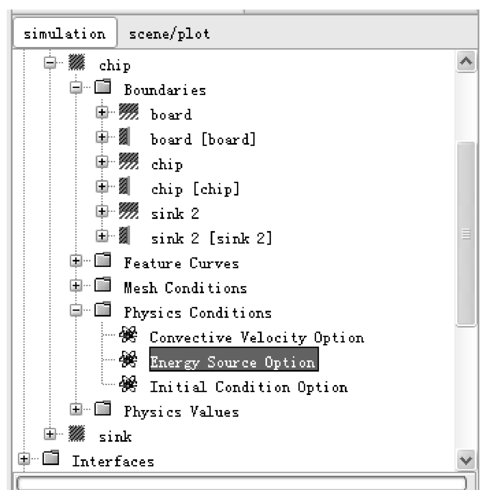


图 3-67 Energy Source Option 选项

选中属性栏中的“Energy Source Term”项，如图 3-68 所示。

点击图3-67中的[Regions] > [chip] > [Physics Values] > [Energy Source] > [Constant]。chip的体积为1200×10^{-9} m^3，发热量为1.0W，转换为单位体积的发热量为833333.3W/m^3。因此把属性栏中的Value更改为[8.33E5]，如图3-69所示。

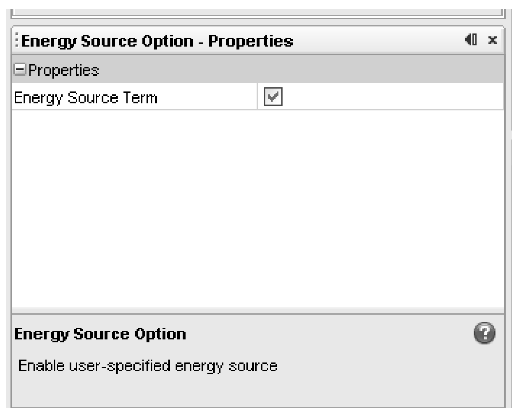


图3-68　选中Energy Source Term

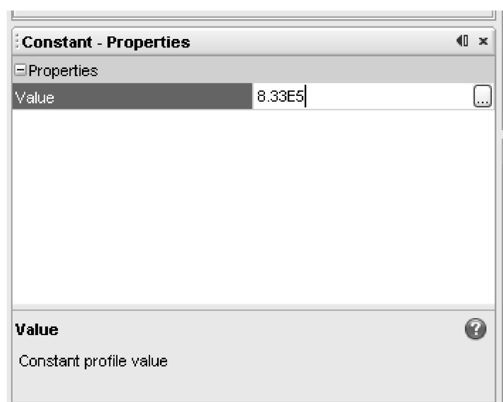


图3-69　单位体积的发热量

计算还需定义IC芯片和散热器间的热阻抗。点击[Regions] > [sink] > [Boundaries] > [Copy of sink 2]，确定考虑热阻抗边界条件的位置。确认名为"Copy of sink 2[sink 2]"的Interface被定义了，如图3-70所示。

点击[Interfaces] > [sink 2] > [Contact Resistance] > [Constant]。面积为0.0004m^2，热阻抗为0.5K/W，输入的单位面积热阻为0.0002m^2 · K/W。把属性栏中的Value值更改为[2E-4]，如图3-71所示。

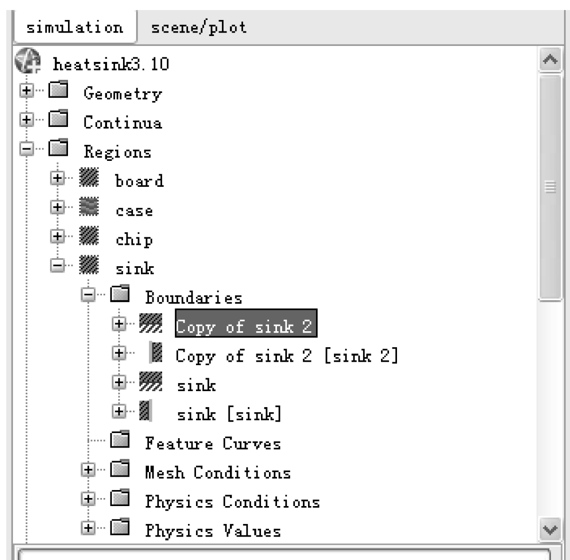


图3-70　热阻抗边界

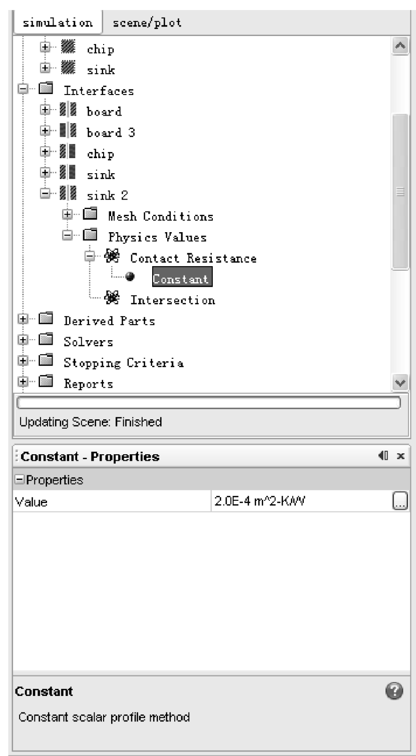


图3-71　Contact Resistance选项

3.3.2 非定常计算设置

1. 时间步设定

点击[Solvers]>[Implicit Unsteady]，确认属性栏中的“Time-Step”项为1.0，如图3-72所示。

Courant数(又称酷瑞数)是决定时间步的一个无量纲数。Courant数如果比较大的话，由于时间精度的问题，可能无法正常计算下去。对于标准的k-ε湍流模型，该值在100以下时，计算比较稳定。Courant数根据分析条件可能要取更小的值。

如果不知道Courant数是多大的时候，可以用Report功能求出最大的Courant数。

右键选择[Reports]>[New Report]>[Maximum]，生成[Reports]>[Maximum 1]，如图3-73所示。

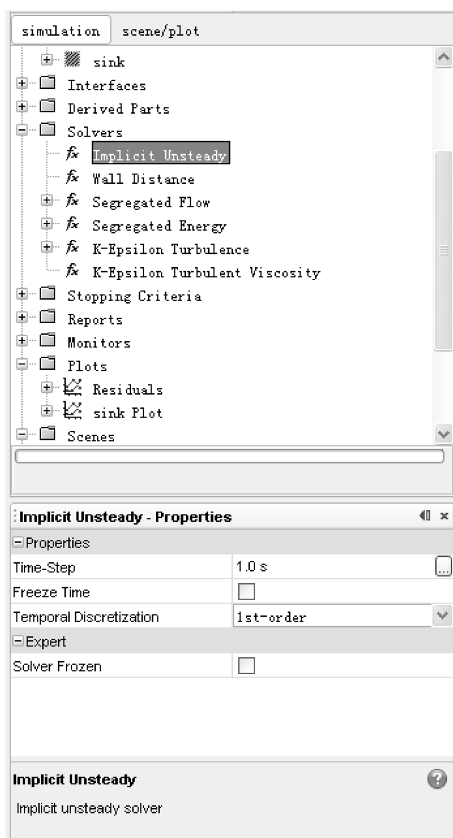


图3-72 Time-Step(时间步)

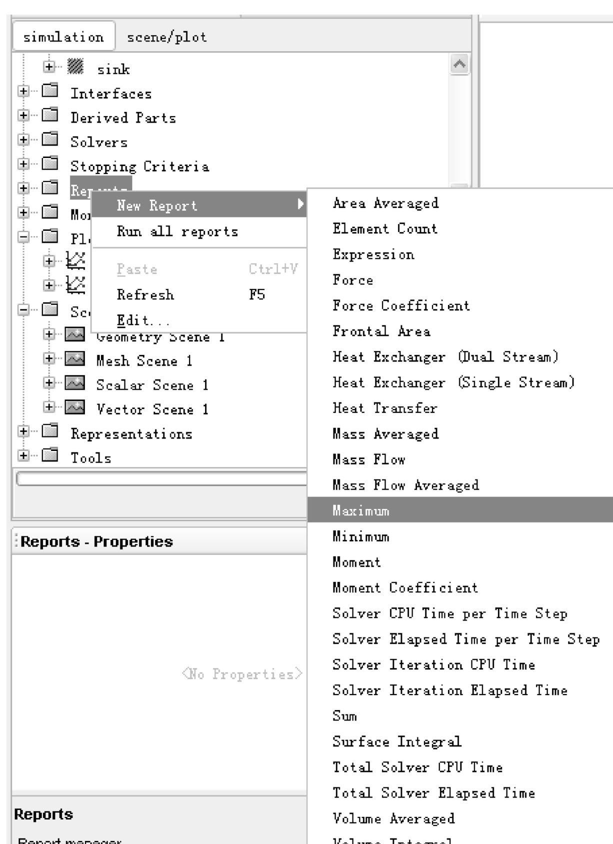


图3-73 新建Maximum函数

把属性栏中的“Scalar Field Function”项更改为“Convective Courant Number”，如图3-74所示。

全选属性栏窗口的“Parts”项中的对象，如图3-75所示。

右键点击[Reports]>[Maximum 1]，选择[Create Monitor and Plot from Report]，如图3-76所示。

右键点击［Plots］>［Maximum 1 Plot］，选择“Open”按钮，如图 3-77 所示。

这样计算过程中就可以得到最大 Courant 数，以判断仿真分析的准确性。

2. 松弛因子设定

点击［Solvers］>［Segregated Energy］。如图 3-78 所示，将属性栏中的“Solid Under-Relaxation Factor”项的值更改为 1.0。计算流固耦合换热时固体的松弛因子默认取比较大的值（0.99 或 1.0），这样可以加速计算。

3. 追加计算结束条件

追加［X 方向流速残差］、［能量残差］为计算结束条件。

右键点击［Stopping Criteria］。如图 3-79 所示，从“Create from Monitor”项中分别选择“X-momentum”、“Energy”2 个方程。确认追加结束对象，如图 3-80 所示。

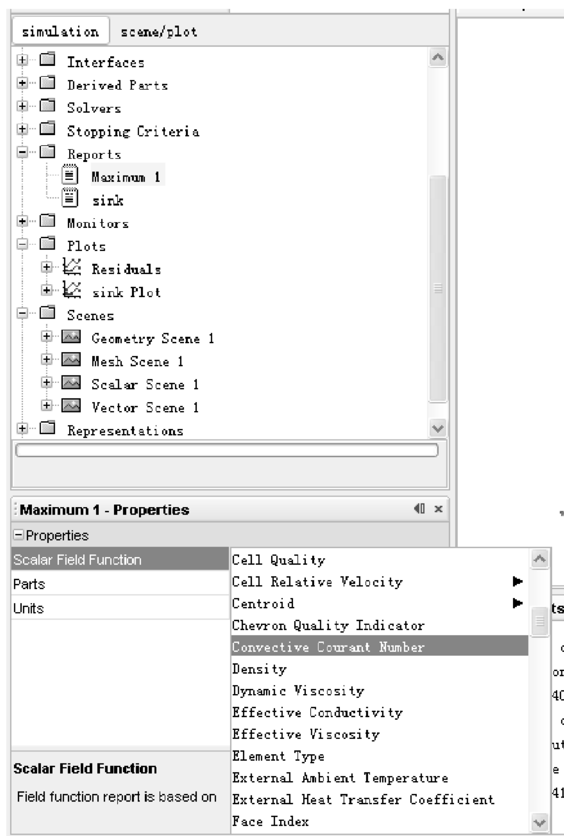


图 3-74　设置 Scalar Field Function

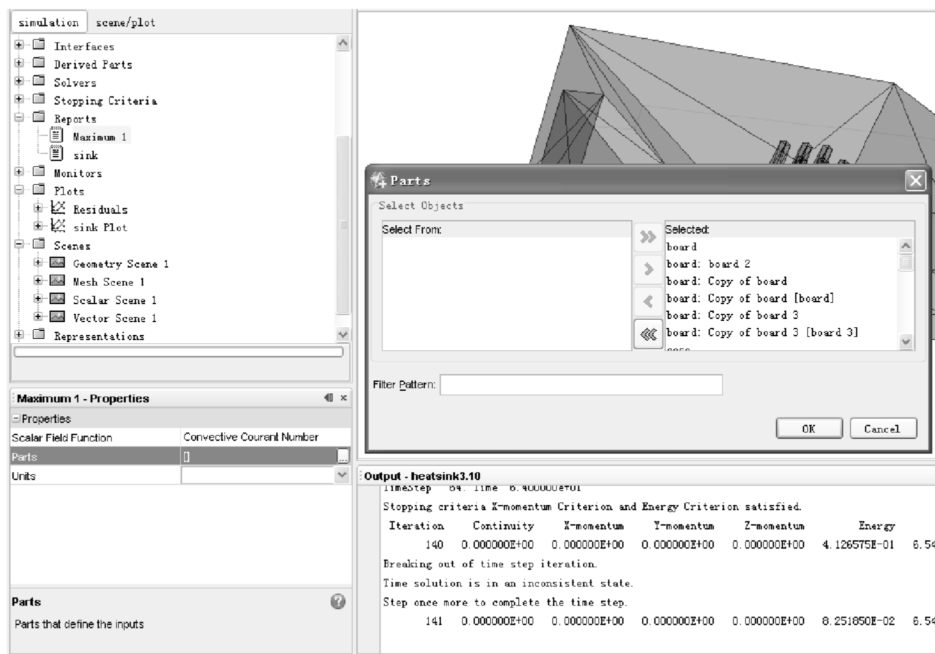


图 3-75　选择 Convective Courant Number 对象

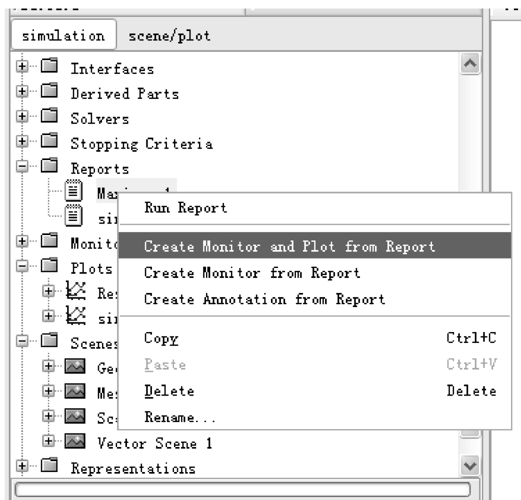


图 3-76 Create Monitor and Plot from Report 功能

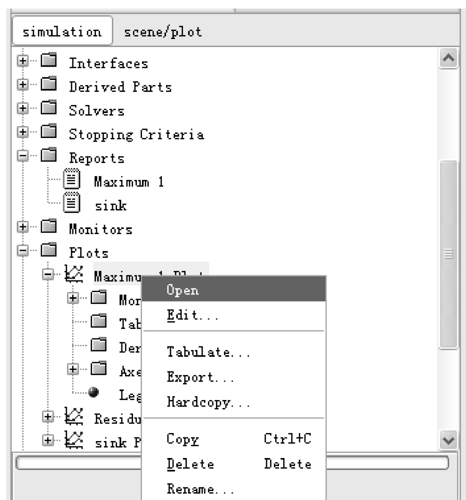


图 3-77 打开图表

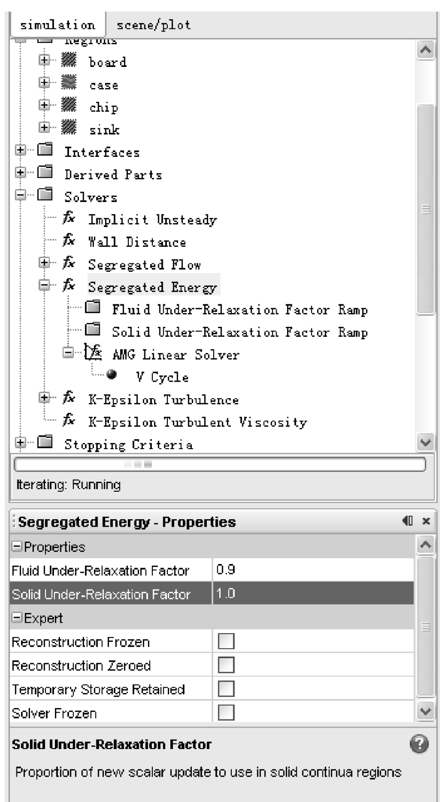


图 3-78 更改 Solid Under-Relaxation Factor

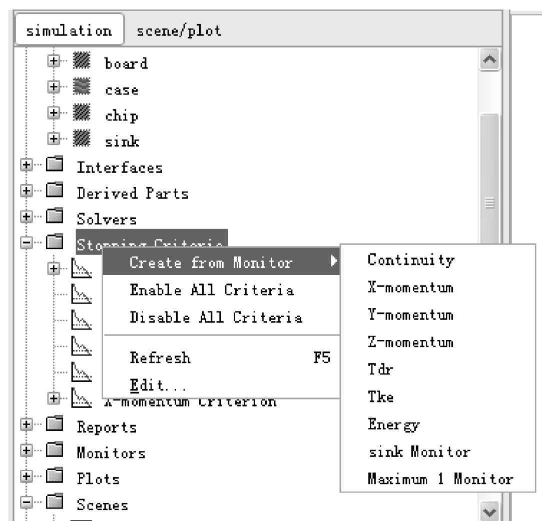


图 3-79 创建 X-momentum、Energy 方程

4. 变更残差计算结束条件

同时选择[Stopping Criteria]>[Energy Criterion]和[Stopping Criteria]>[X-momentum Criterion]，其属性栏中“Logical Rule”项为“Or”，如图 3-81 所示。

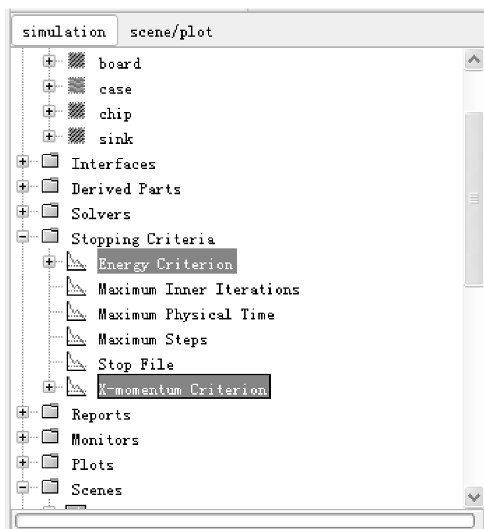


图3-80 确认追加结束对象

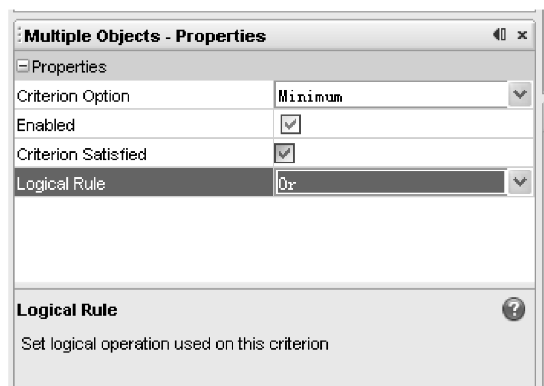


图3-81 选择 Energy Criterion 和 X-momentum Criterion

更改属性栏中的“Logical Rule”项为[And]，如图3-82所示。

分别点击[Stopping Criteria]>[Energy Criterion]>[Minimum Limit]、[Stopping Criteria]>[X-momentum Criterion]>[Minimum Limit]，如图3-80所示。

更改属性栏中的“Minimum Value”值为0.1，如图3-83所示。

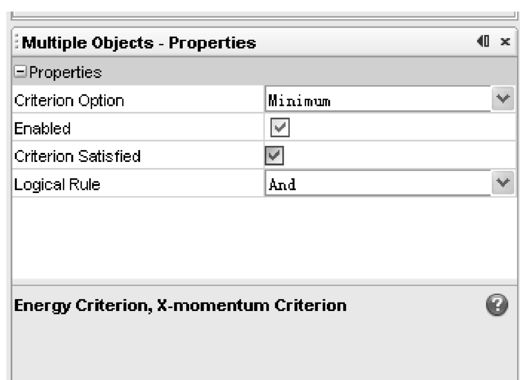


图3-82 更改 Logical Rule

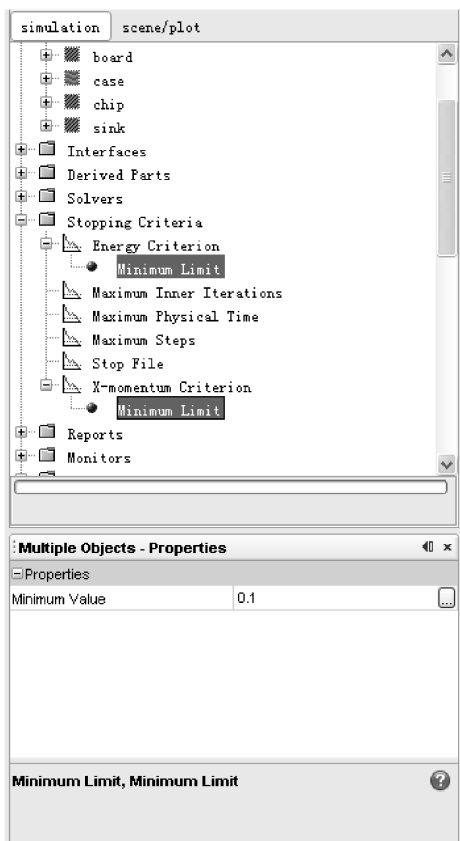


图3-83 设置 Minimum Value

5. 更改计算结束条件

点击[Stopping Criteria] > [Maximum Inner Iterations]，如图 3-84 所示。

确认属性栏中的“Max Inner Iterations”值为 20，如图 3-85 所示。Inner Iteration 是各个时间步内的最大迭代步数。

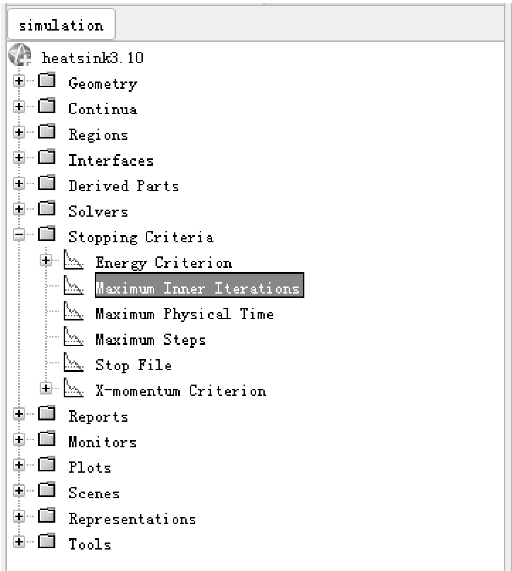


图 3-84 选择 Maximum Inner Iterations

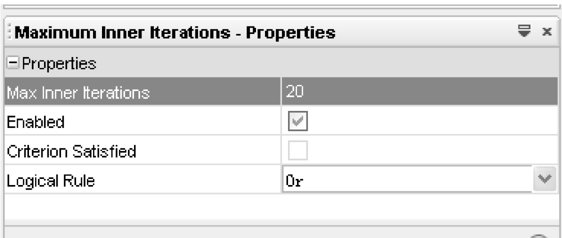


图 3-85 Max Inner Iterations 选项

如果这个值比较小，有可能迭代完了内部迭代步数，接下来就进行下一个时间步的计算，说明这个时间步还没有能够收敛。

如果计算过程中，输出窗口出现图 3-86 所示的不收敛信息，请加大“Inner Iterations”项的值，再继续进行计算。

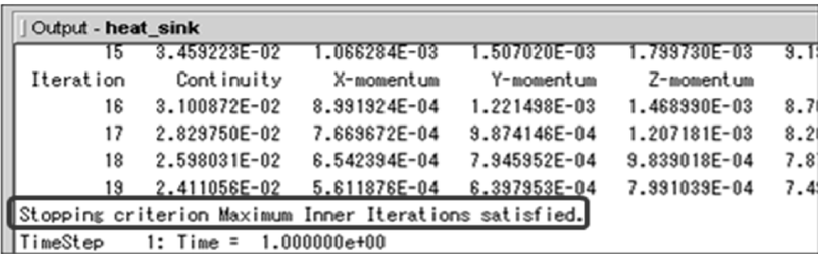


图 3-86 不收敛信息

选择[Stopping Criteria] > [Maximum Physical Time]，如图 3-87 所示。

在属性栏中的“Max Physical Time”项中输入 6000，如图 3-88 所示。

点击[Stopping Criteria] > [Maximum Steps]。如图 3-89 所示，取消选择属性栏中的“Enabled”项，这样就不会由于迭代步数到达了最大值而终止计算了。

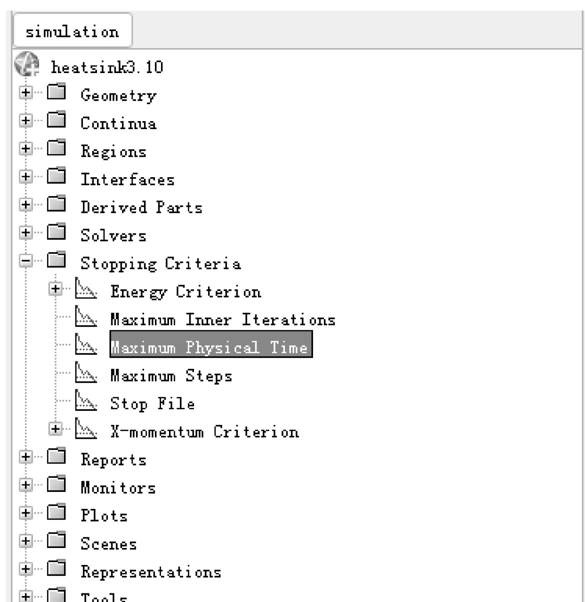


图 3-87　Maximum Physical Time 选项

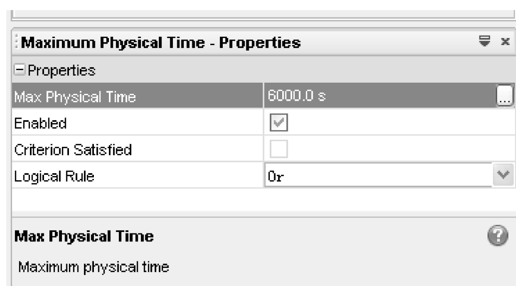


图 3-88　输入 Max Physical Time

3.3.3　体网格的生成

1. 边界层策略

为准确模拟固体与固体结合表面、流固结合表面的流动换热现象，对全部的 Interface 面生成边界层网格。

点击[Interfaces]>[board]>[Mesh Conditions]>[Interface Prism Layer Option]，如图 3-90 所示。

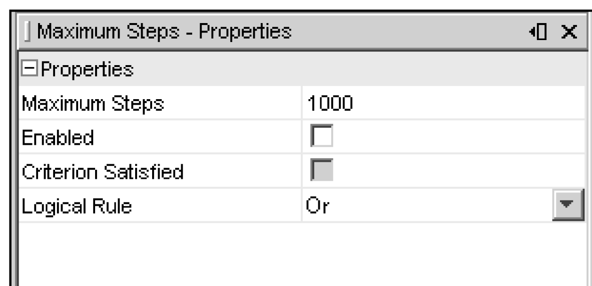


图 3-89　Maximum Steps 选项

在属性栏中勾选“Grow Prisms from Interface”项使其生效，如图 3-91 所示。

用同样的方法设定其他 Interface。

2. 生成体网格

体网格的其余设置不变。点击工具栏中的按钮，开始生成体网格，同时生成 Remeshed 网格。

如图 3-92 所示，右键点击视图区，选择[Apply Representation]>[Remeshed Surface]。所生成的 Remeshed 网格如图 3-93 所示。

右键选择[Apply Representation]>[Volume Mesh]，所生成的多面体网格如图 3-94 所示。

3.3.4　执行计算

点击工具栏图标，执行计算。可以在计算过程中实时监测不同的视图窗口，如温度场变化、流场变化和固体平均温度变化等，如图 3-95 所示。下一节将会详细详述这些视图的创建方法。

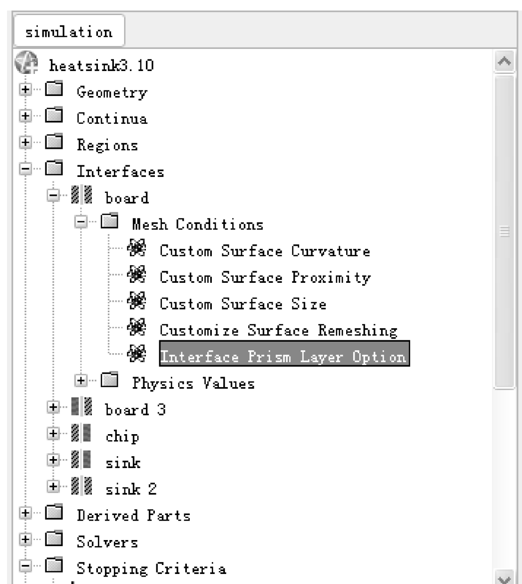


图 3-90 Interface Prism Layer Option 选项

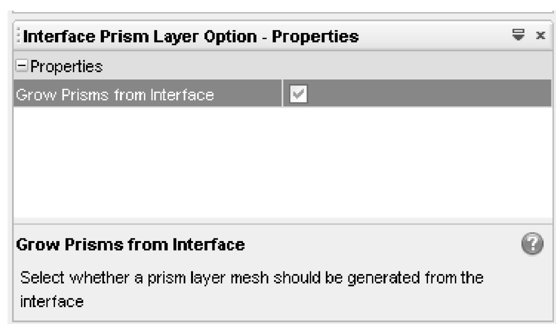


图 3-91 勾选 Grow Prisms from Interface

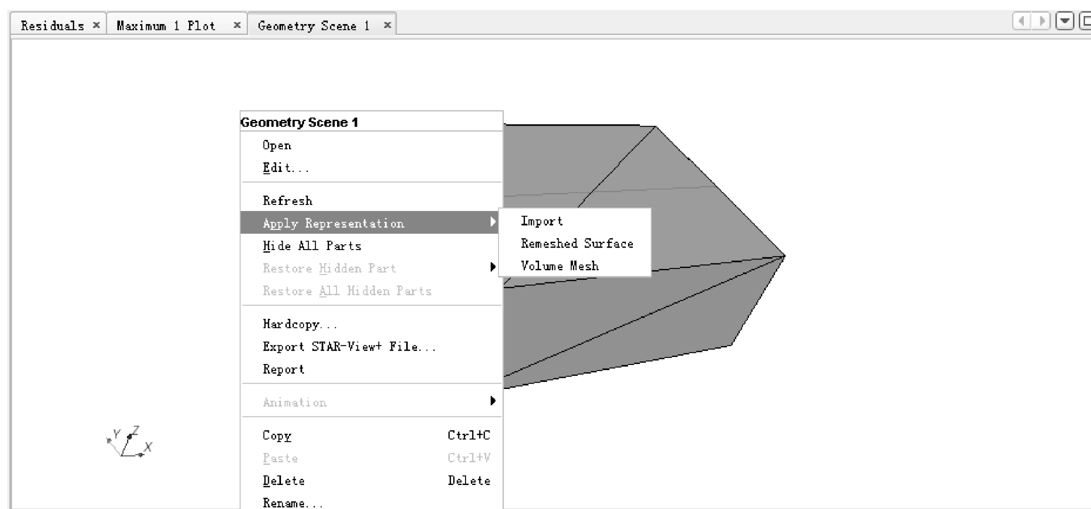


图 3-92 更换视图

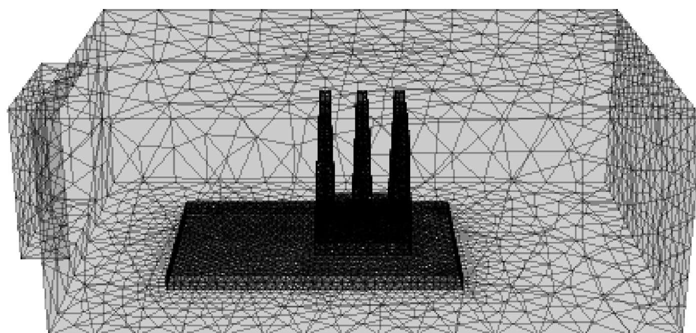


图 3-93 Remeshed 网格

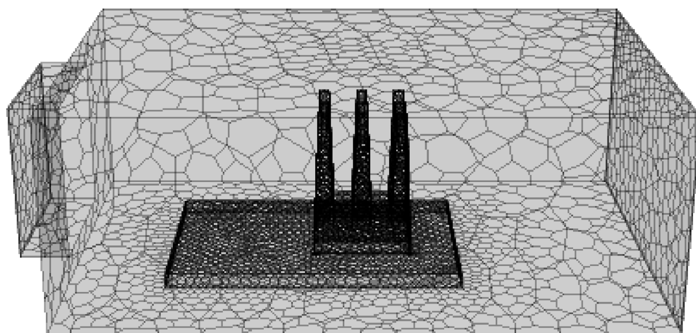


图 3-94　多面体网格

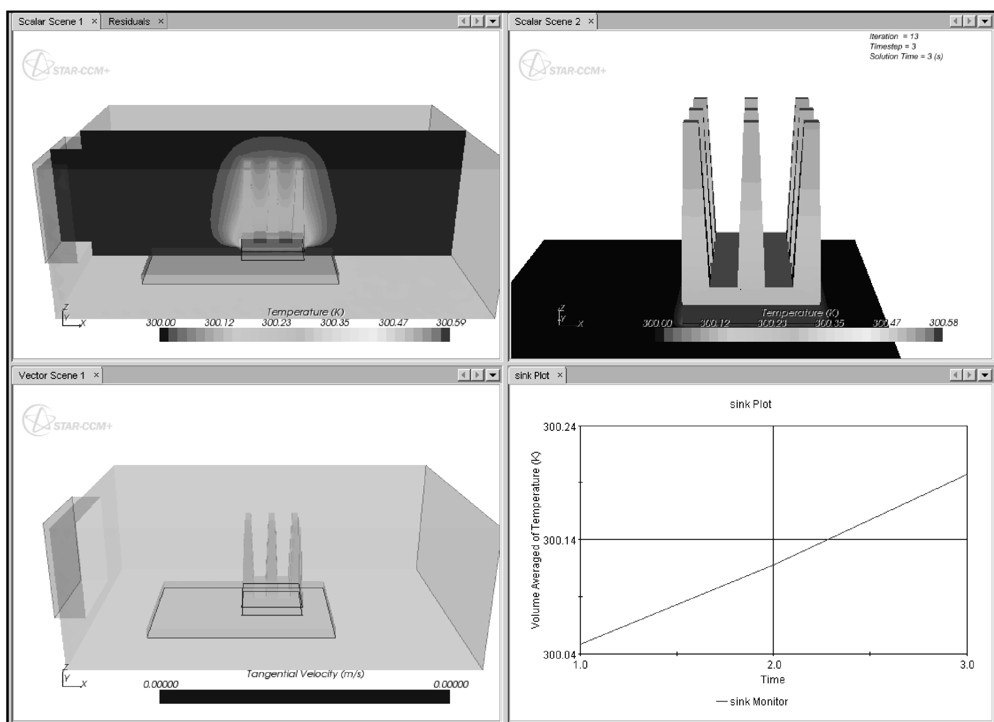


图 3-95　实时监测视图窗口

3.4　计算结果后处理

3.4.1　截面设定

如图 3-96 所示，右键点击树状模拟管理窗口中的[Derived Parts]。选择[New Part] > [Section...] > [Plane...]。

在[Create Section]面板的[Plane Parameters]中输入截面参数：

origin　[x,y,z] = [0,0,0]

normal　[x,y,z] = [0,1,0]

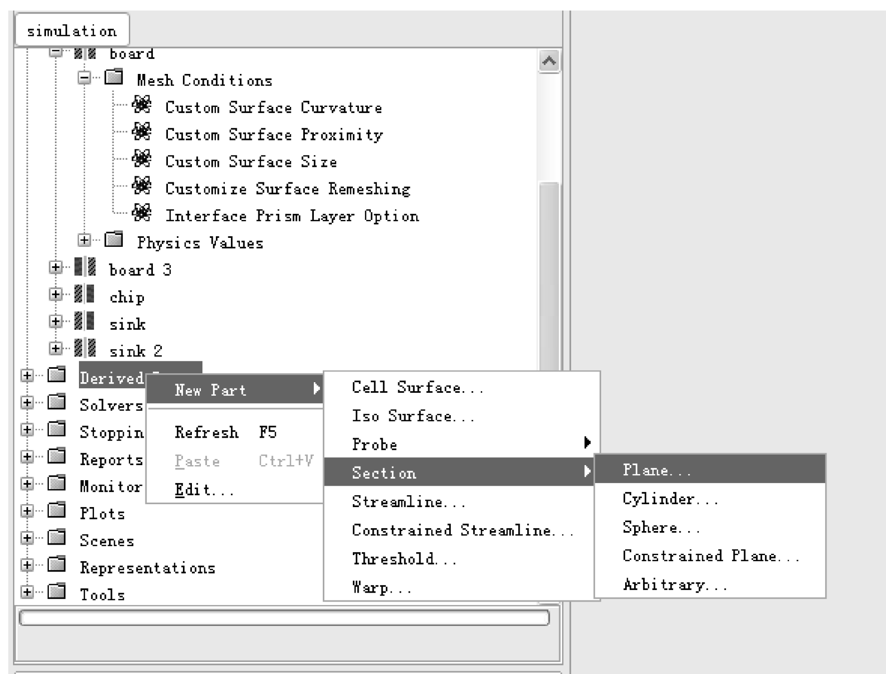


图 3-96　设置截面

其中，origin 指轴线所在方向或点位置，normal 指轴线或点所在的法线方向。输入后的截面参数如图 3-97 所示。

确认新建截面的位置，在图 3-98 中显示为一条黑色直线。点击“Create”按钮，生成如

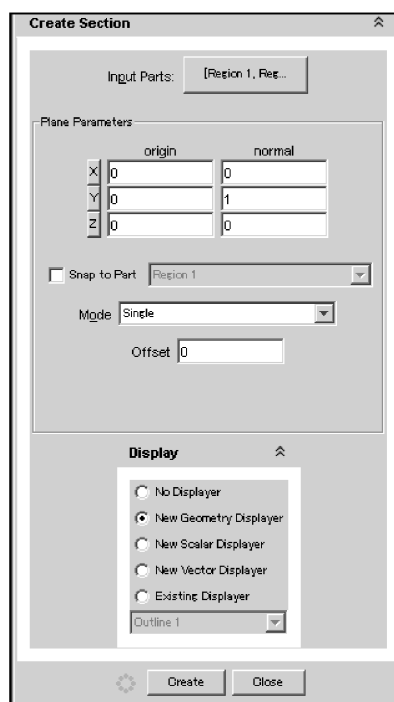


图 3-97　Plane Parameters(平面参数)

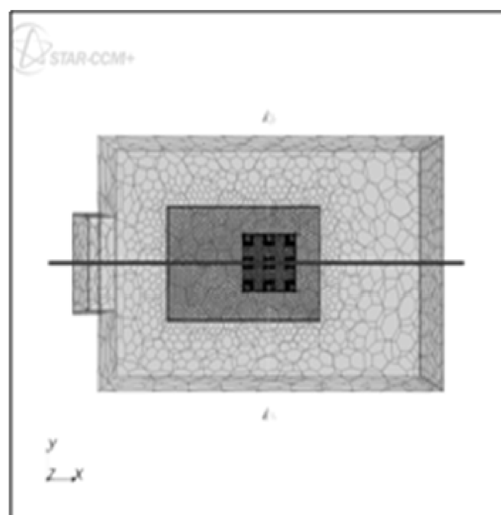


图 3-98　截面在视图中的位置

图 3-98 所示的截面。

如图 3-99 所示，右键点击[Scenes] > [Mesh Scene 1] > [Displayers] > [Mesh 1]，选择[Toggle Visibility]，视图区的体网格消失。

选择[Scenes] > [Mesh Scene 1] > [Displayers] > [Mesh 1] > [Parts] > [plane section]，选择建立的平面截面，如图 3-100 所示。

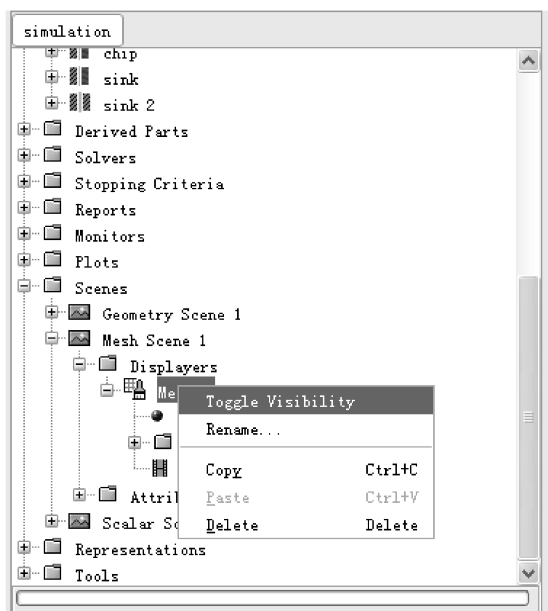


图 3-99　选择 Toggle Visibility

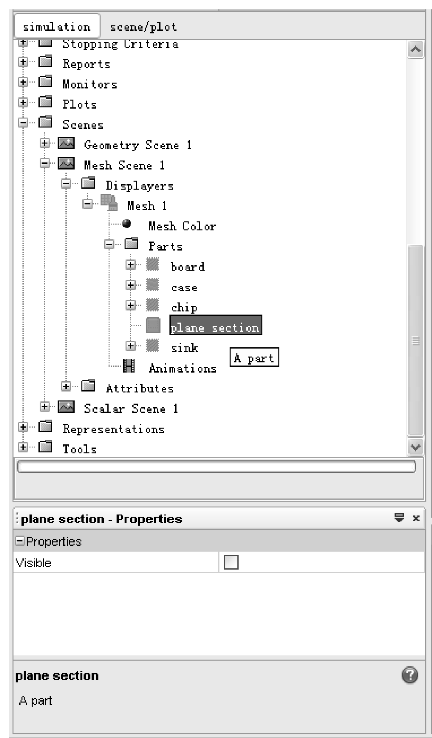


图 3-100　选择 plane section

选中 plane section 属性栏中的“Visible”项，如图 3-101 所示。



图 3-101　显示网格

截面上的网格显示在视图窗口中，如图 3-102 所示。

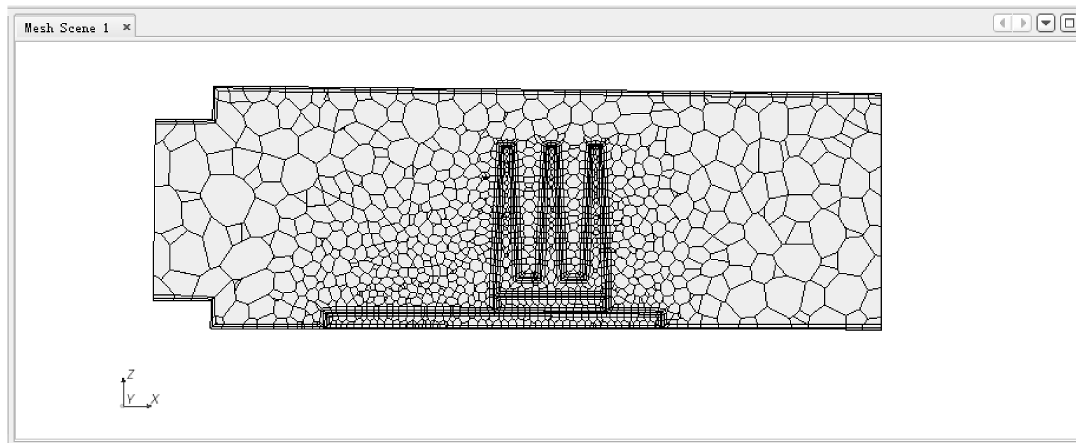


图 3-102　截面上的网格

3.4.2　模型半透明显示

双击[Scenes]>[Geometry Scene 1]，打开散热器模型。点击[Scenes]>[Geometry Scene 1]>[Displayers]>[Geometry 1]，如图 3-103 所示。

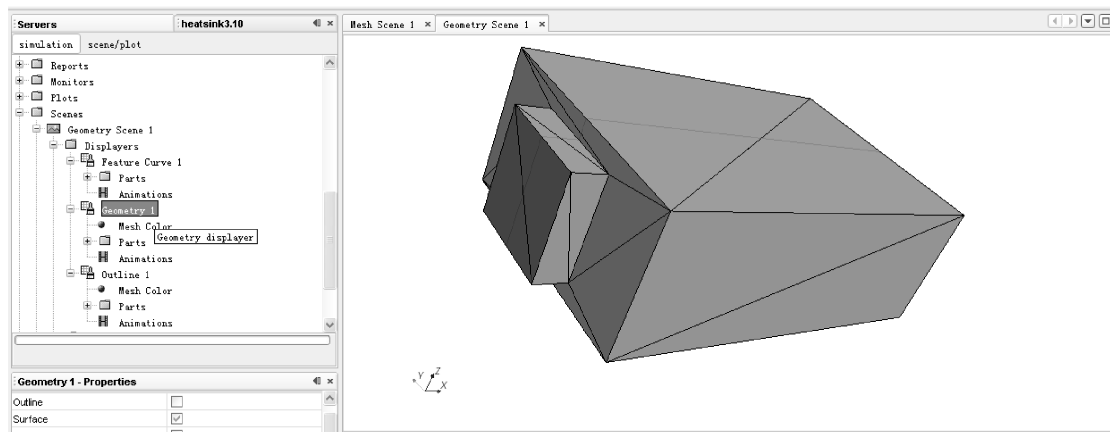


图 3-103　打开散热器模型

在属性栏点击“Opacity”项的数值“1.0”，弹出图 3-104 所示的透明度调整滑块。“Opacity”项的初始值设置为 1。

在透明度调整滑块上的“value”项中输入“0.2”，如图 3-105 所示。透明度变化后的视图如图 3-106 所示。

修改“Opacity”项的数值“0.5”，视图区的散热器模型如图 3-107 所示。

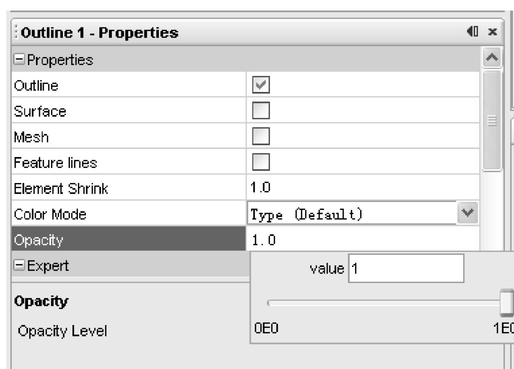


图 3-104　显示物体表面

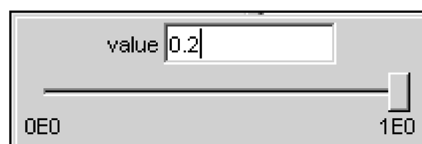


图 3-105　透明度设置

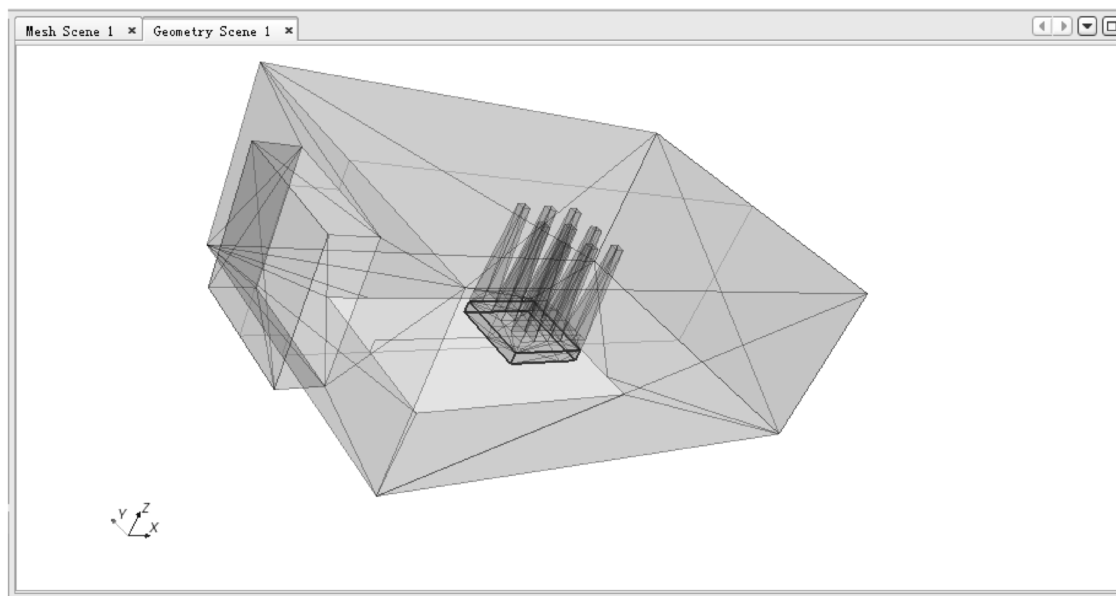


图 3-106　透明度变化后的视图

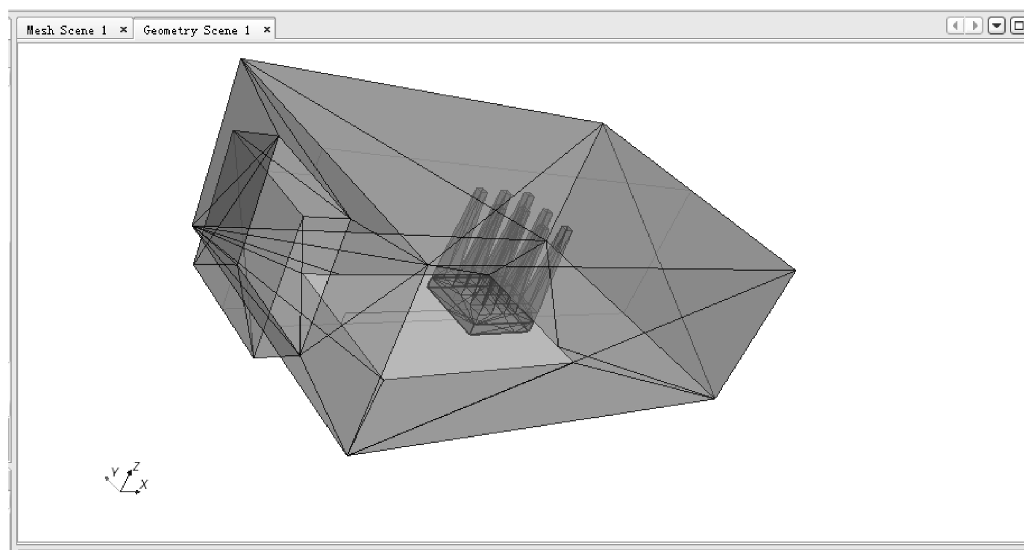


图 3-107　透明度为 0. 5 的散热器模型

3.4.3 速度矢量图显示

单击工具栏的图标，选择[Create/Open Scenes]>[Vector]，如图 3-108 所示。

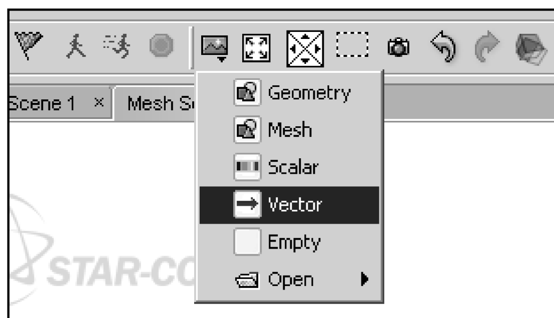


图 3-108 选择速度矢量图工具

视图区的矢量图初始图如图 3-109 所示。

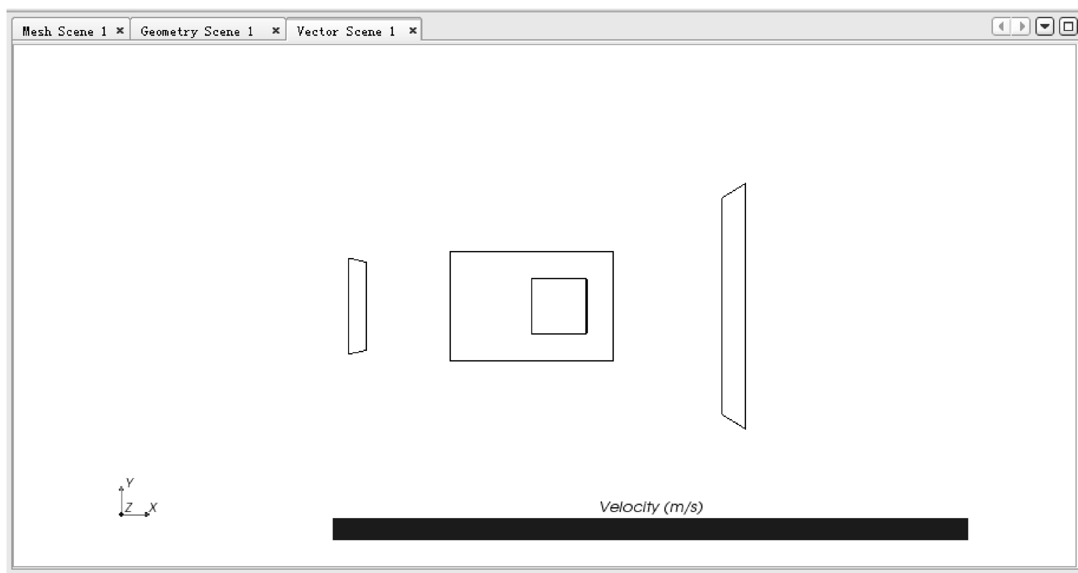


图 3-109 视图区的矢量图初始图

选择[Scenes]>[Vector Scene 1]>[Displayers]>[Vector 1]，打开“Vector Scene 1”视图窗口，如图 3-110 所示。

如图 3-111 所示，更改属性栏中的“Projection Mode”项为“Tangential”方式，切换为切向速度的显示方式。

视图窗口中的标尺栏更改为“Tangential Velocity(m/s)”，如图 3-112 所示。

点击[Scenes]>[Vector Scene 1]>[Displayers]>[Vector 1]>[Parts]。

选择属性栏中“Parts”项右侧的按钮。在弹出的“Parts”对话框中，从“Select Objects”列表框中选择“plane section”，点击按钮，选中“plane section”，如图 3-113

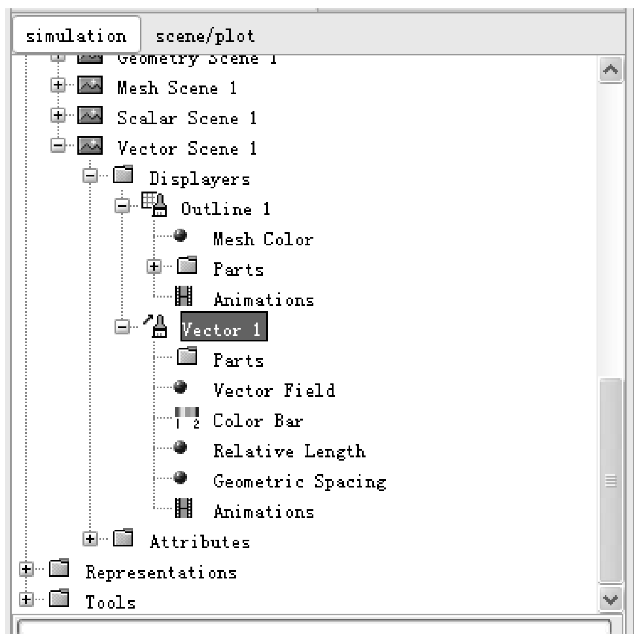


图 3-110　选择 Vector 1

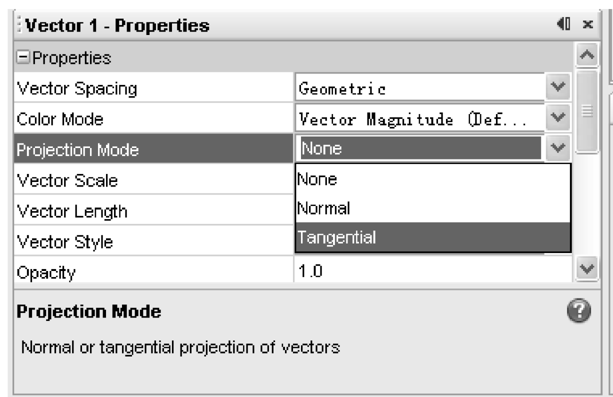


图 3-111　更改 Projection Mode

所示。

点击“OK”按钮，视图区矢量图和速度图标如图 3-114 所示。

根据视图区的坐标轴显示方式，更换视图方式。点击工具栏按钮，选择[Standard Views] > [(+Y)right]，如图 3-115 所示。

视图区 +Y 方向的矢量图如图 3-116 所示。

3.4.4　流体截面温度云图显示

流体截面温度云图可以在计算过程中实时监控。点击工具栏的图标，选择[Create/Open Scenes] > [Scalar]，新建温度云图，如图 3-117 所示。

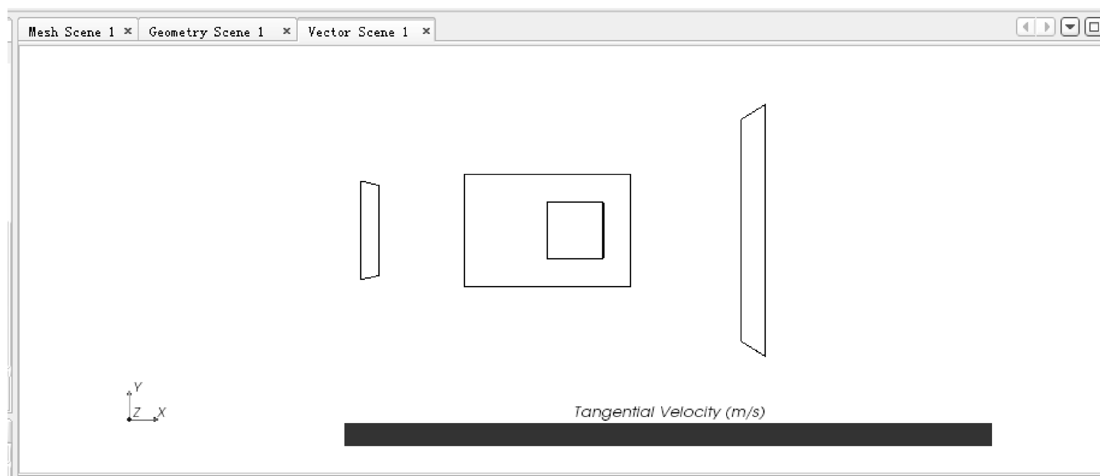


图 3-112　标尺栏更改为 Tangential Velocity

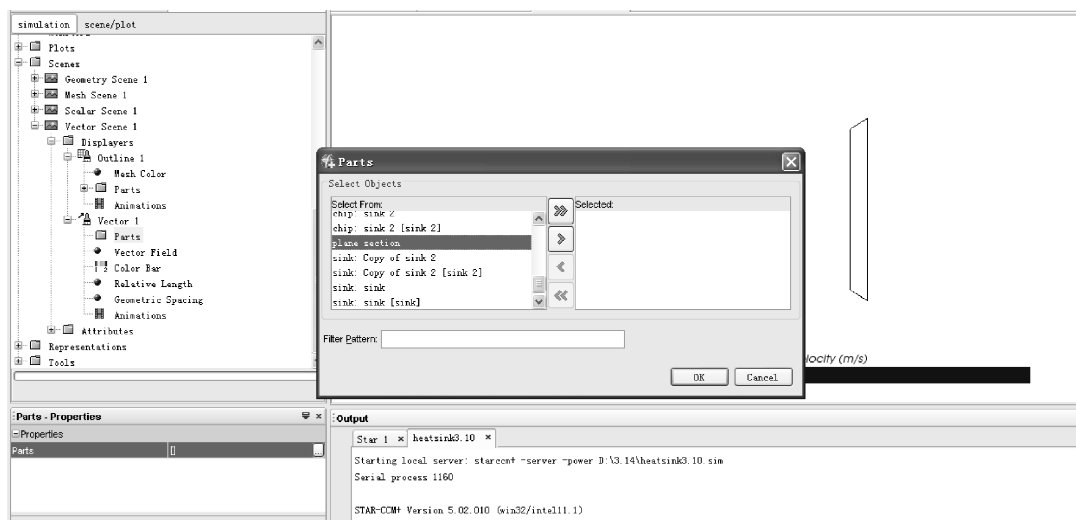


图 3-113　选择 plane section

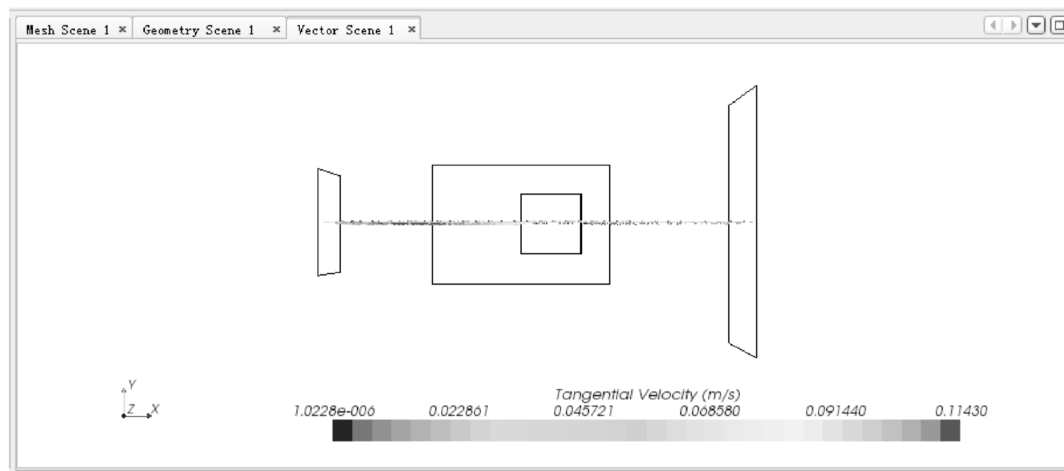


图 3-114　视图区矢量图和速度图标

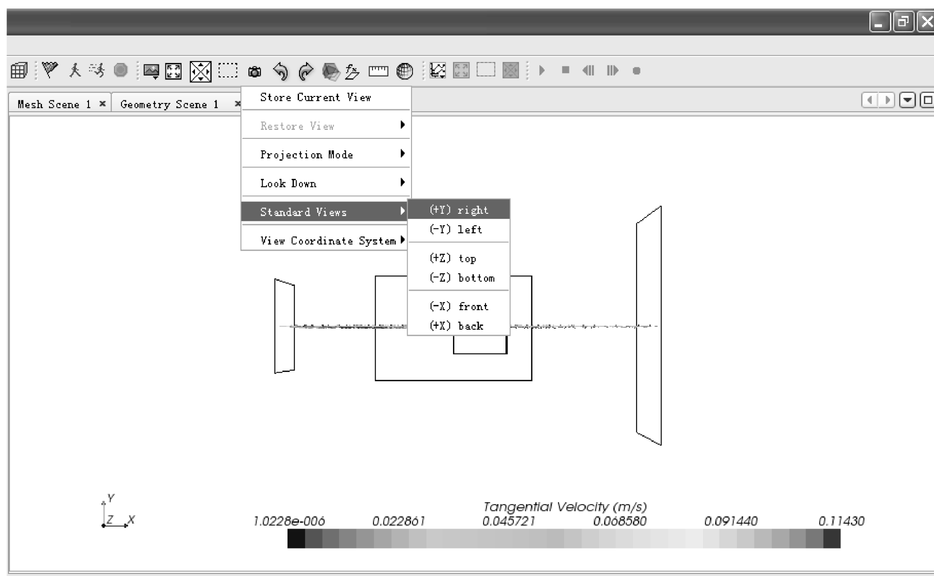


图 3-115　更换视图方式

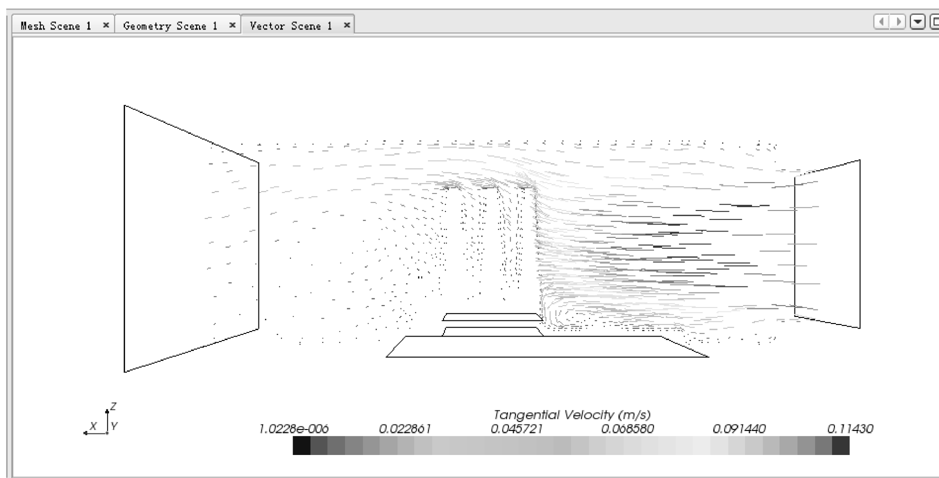


图 3-116　+Y 方向的矢量图

选择[Scenes] > [Scalar Scene 1] > [Displayers] > [Scalar 1]，如图 3-118 所示。

选择属性栏中的[Contour Style]下拉菜单为[Smooth Filled]，如图 3-119 所示。

选择[Scenes] > [Scalar Scene 1] > [Displayers] > [Scalar 1] > [Parts]，如图 3-120 所示。

在属性栏窗口中点击“Parts”右侧的按钮[...]，从“Select Objects”栏中选取“plane section”，点击[>]，同时取消选择其他所有边界，如图 3-121 所示。

点击[Scenes] > [Scalar Scene 1] > [Displayers] > [Scalar 1] > [Scalar Field]，如图 3-122 所示。

在属性栏的“Function”栏下拉菜单中选择“Temperature”项作为显示变量，如图 3-123 所示。

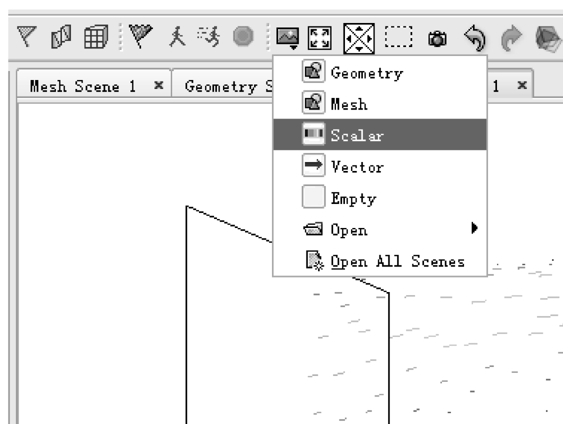


图 3-117　新建温度云图

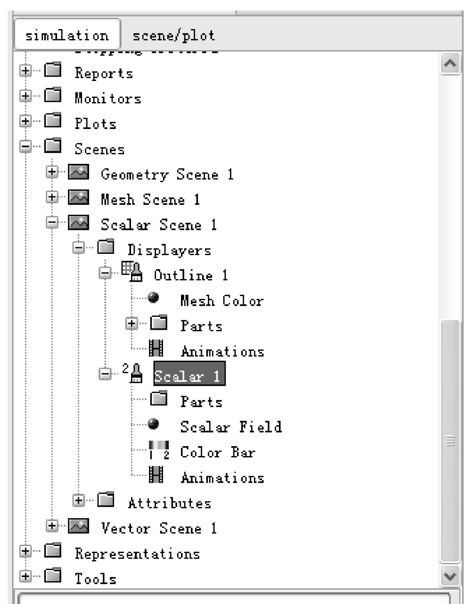


图 3-118　选择 Scalar 1

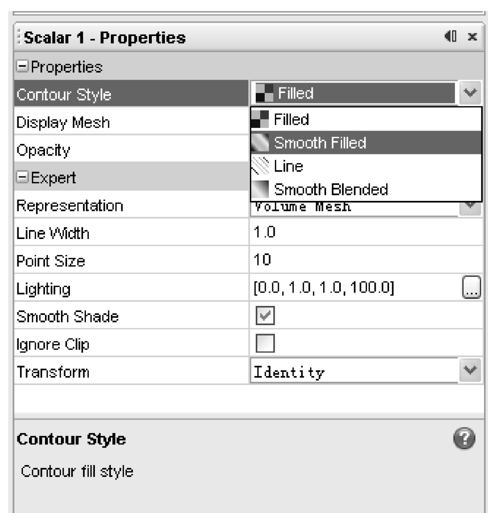


图 3-119　选择 Contour Style

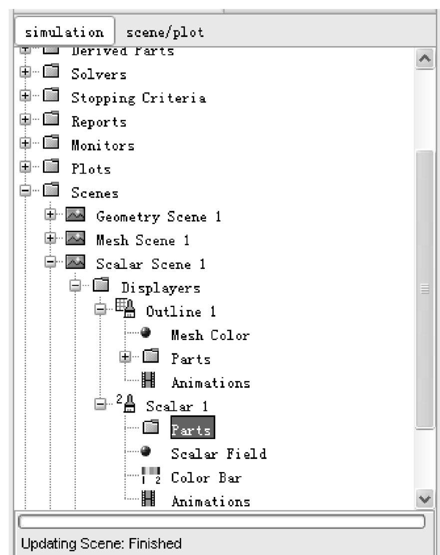


图 3-120　选择需要显示的 Parts

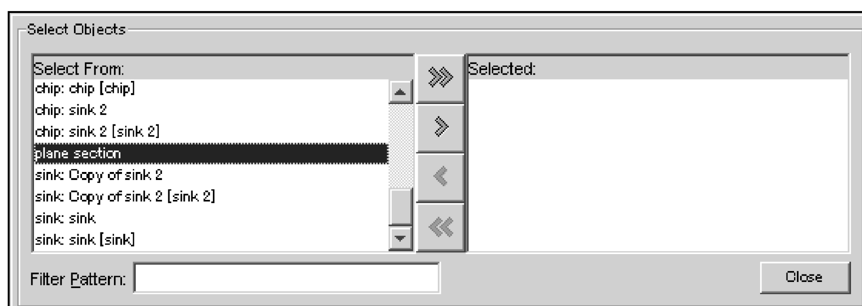


图 3-121　选择 plane section

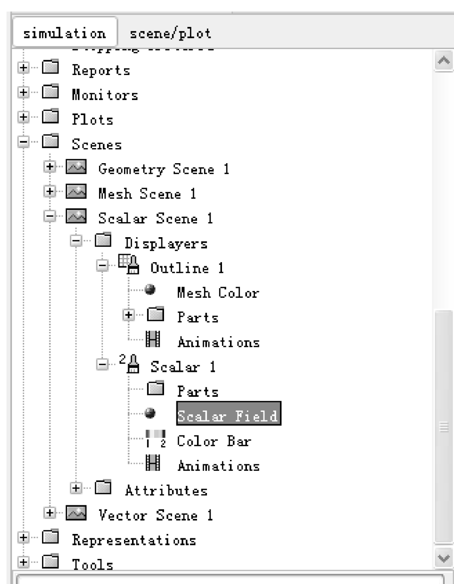


图 3-122　选择 Scalar Field

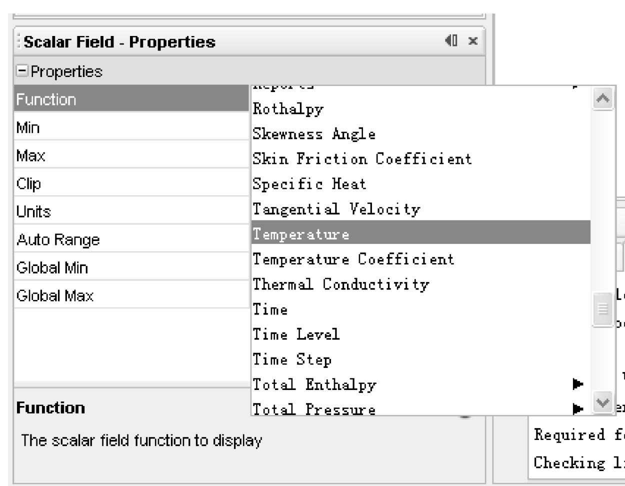


图 3-123　选择 Function

视图窗口中的标尺栏更改为“Temperature（K）”，如图 3-124 所示。

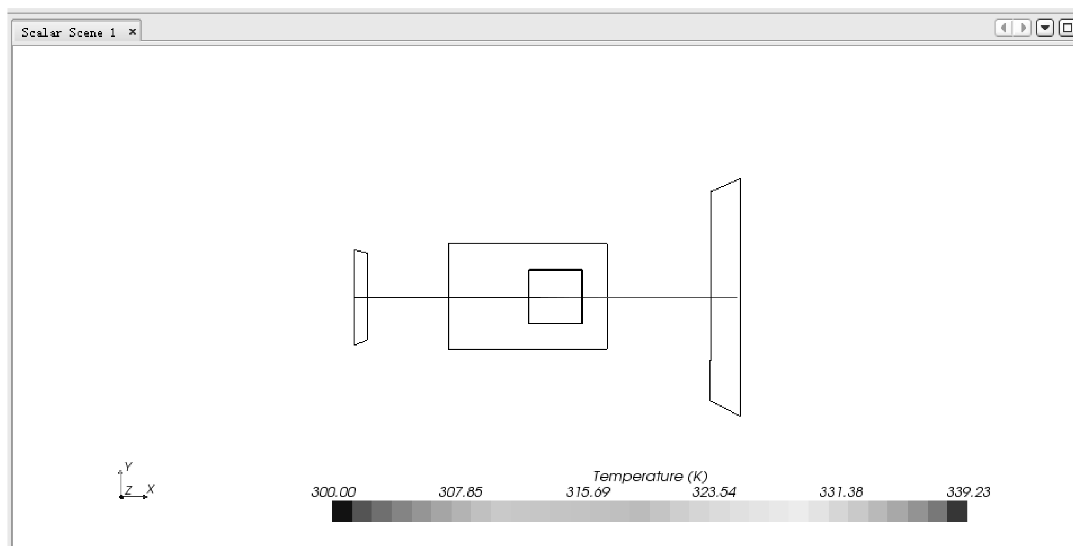


图 3-124　视图窗口中的标尺栏

根据视图区的坐标轴显示方式，更换视图方式。点击工具栏按钮，选择［Standard Views］>［（+Y）right］，视图区 +Y 方向的截面温度云图如图 3-125 所示。

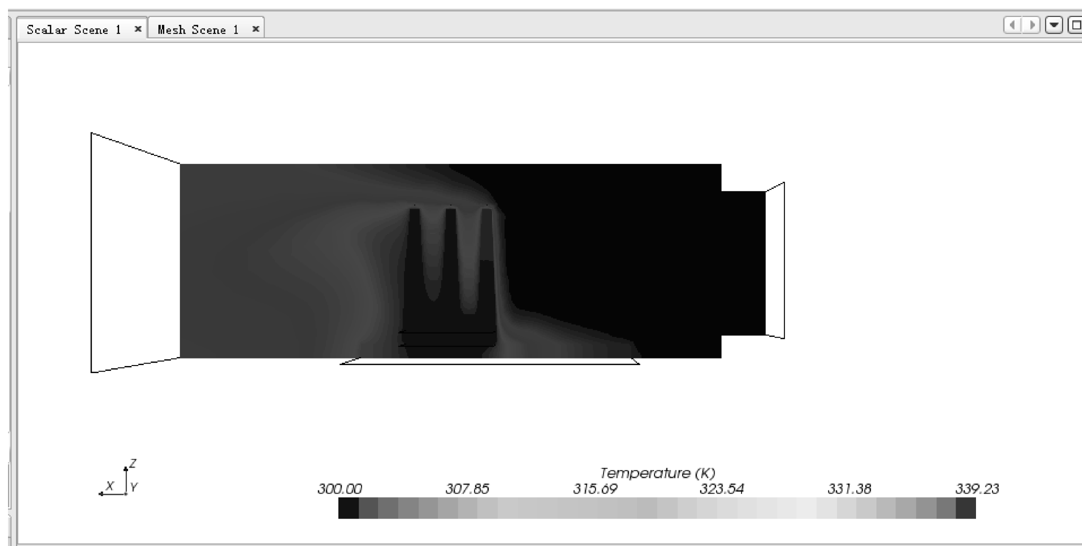


图 3-125 +Y 方向的截面温度云图

3.4.5 固体温度云图结果显示

固体温度云图也可以在计算过程中实时监控。点击工具栏图标[Create/Open Scenes]>[Scalar]，打开[Scalar Scene 2]视图窗口，如图 3-126 所示。

选择[Scenes]>[Scalar Scene 2]>[Displayers]>[Scalar 1]，如图 3-127 所示。

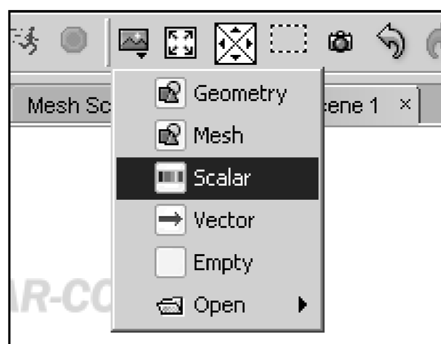


图 3-126 新建 Scalar Scene 2

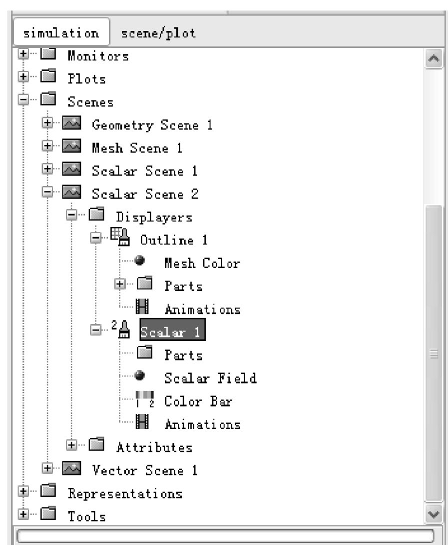


图 3-127 选择 Scalar 1

在属性栏中的“Contour Style”项下拉菜单中选择“Smooth Filled”，如图 3-128 所示。

选择树形菜单[Scenes]>[Scalar Scene 2]>[Displayers]>[Scalar 1]>[Parts]，在属性栏窗口中点击“Parts”项右侧的[...]按钮。从“Select Objects”栏中，选取“board: board 3

[board 3]”、“chip：chip[chip]”、“sink：sink[sink]”，如图 3-129 所示。

点击[Scenes] > [Scalar Scene 2] > [Displayers] > [Scalar 1] > [Scalar Field]。在属性栏中的“Function”项下拉菜单中选择“Temperature”。视图窗口中的标尺栏更改为“Temperature(K)”。

此时视图区的固体温度云图如图 3-130 所示。

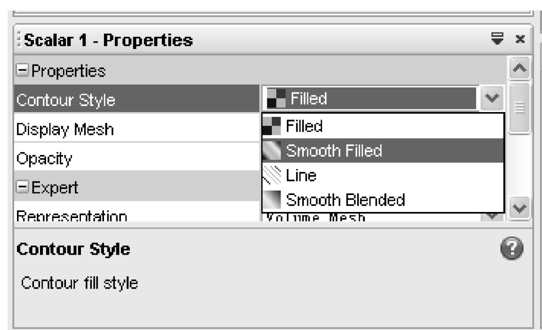


图 3-128　选择“Smooth Filled”

更改云图显示物理量的范围。点击

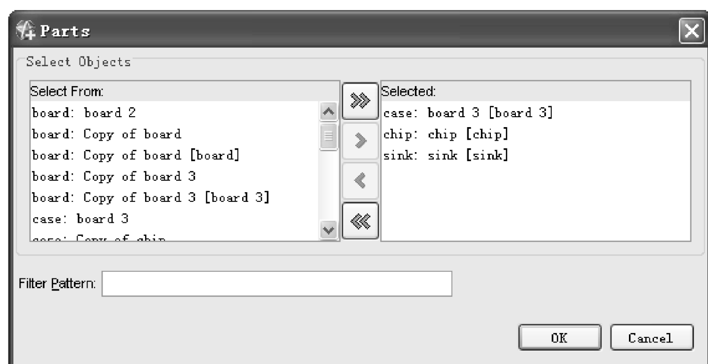


图 3-129　选择固体边界

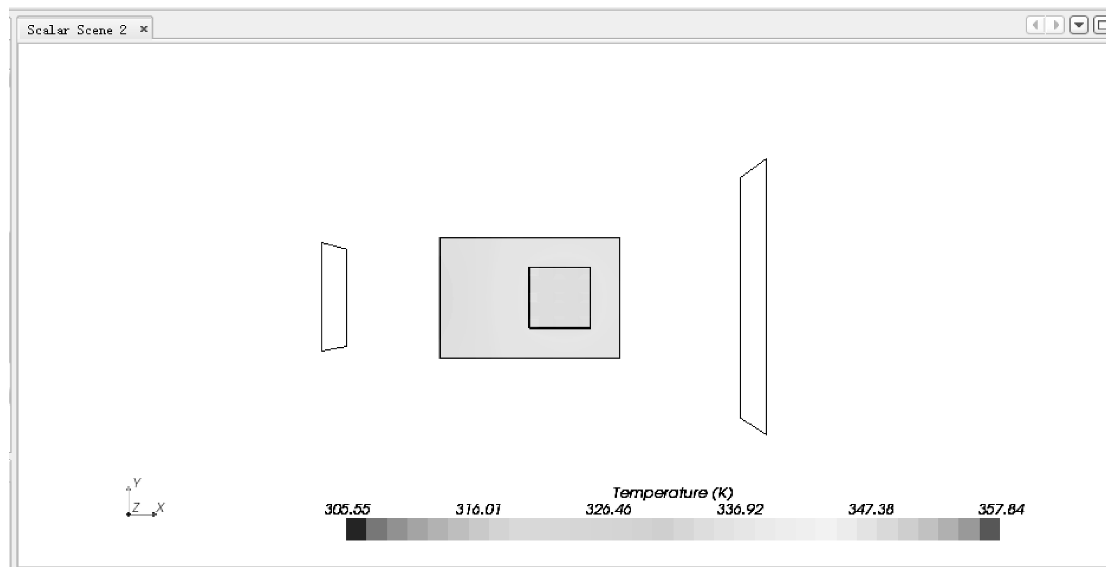


图 3-130　固体温度云图

[Scenes] > [Scalar Scene 2] > [Displayers] > [Scalar 1] > [Scalar Field]，如图 3-131 所示。可以看到，在计算到第 900 步左右时，固体温度范围约为 305.5 ~ 357.8℃。随着计算时间

的增加，固体温度会继续增加，然后逐渐降低。

在属性栏中更改“Min”值和“Max”值，如图3-132所示。这样可以在最大温度范围内观察固体温度的变化情况。

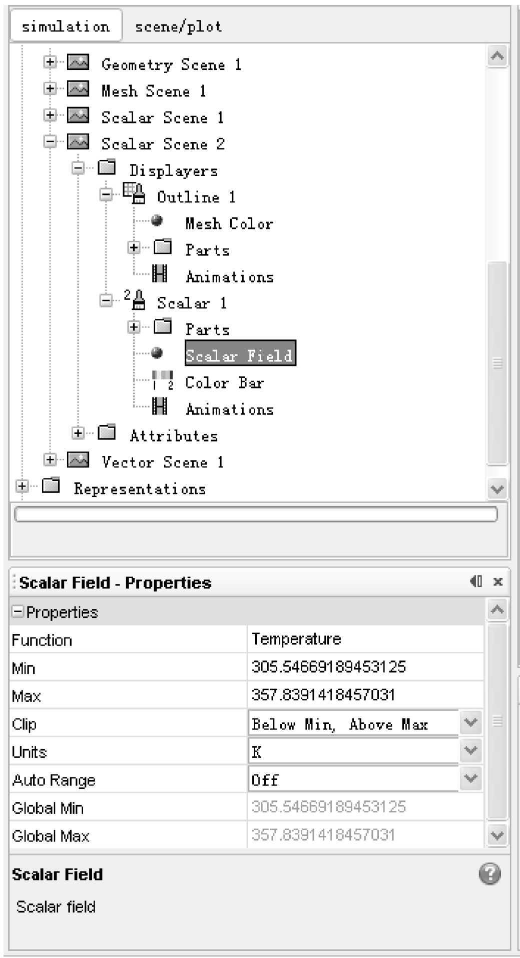


图3-131 选择Scalar Field

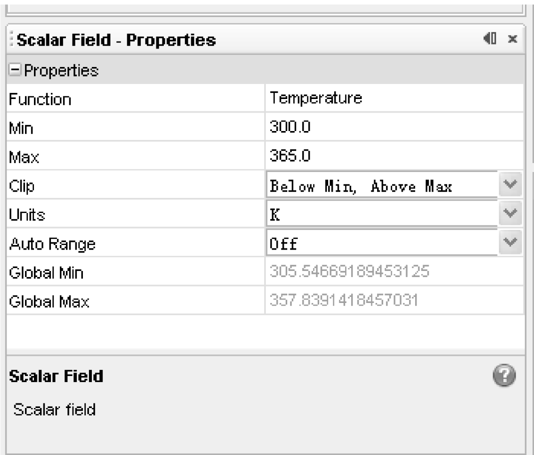


图3-132 修改温度显示范围

在[Min]、[Max]中分别输入[300.0]、[365.0]。

视图区中更改后的标尺栏如图3-133所示。随着计算的进行，可以看到标尺栏的尺度和色带被固定。

3.4.6 获取散热器平均温度

获取散热器的平均温度，作为结果输出。右键点击树形菜单[Reports]。选择[New Report]>[Volume Averaged]，新建Volume Averaged 1，如图3-134所示。

将新生成的“Volume Averaged 1”重命名为“sink”，如图3-135所示。

更改属性栏中的“Scalar”项为“Temperature”，选择温度作为分析变量，如图3-136所示。

将属性栏中的“Parts”项选择为“sink”，如图3-137所示。

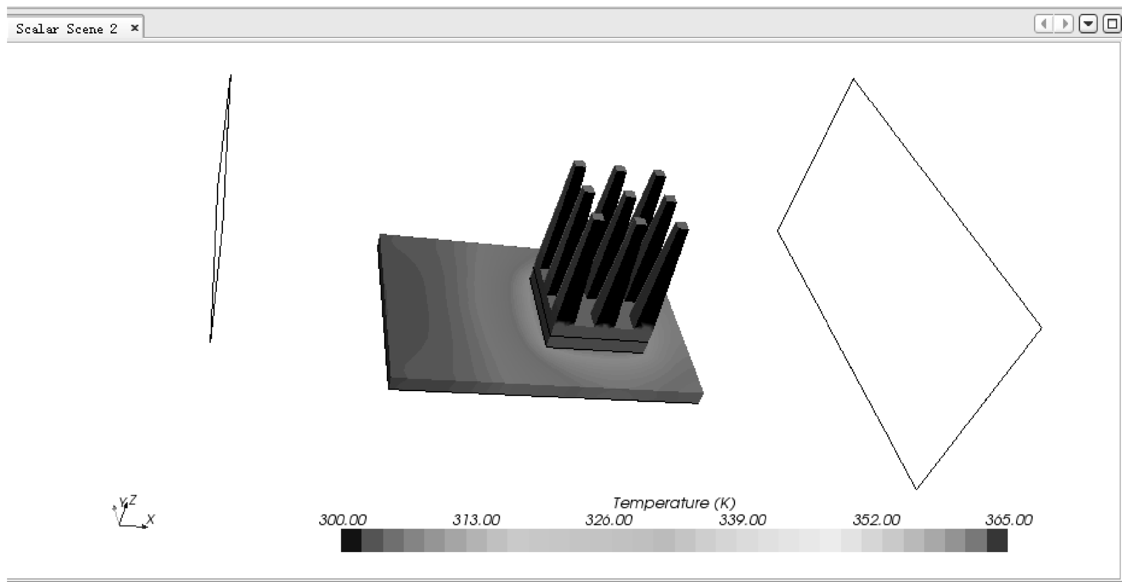


图 3-133　更改后的标尺栏

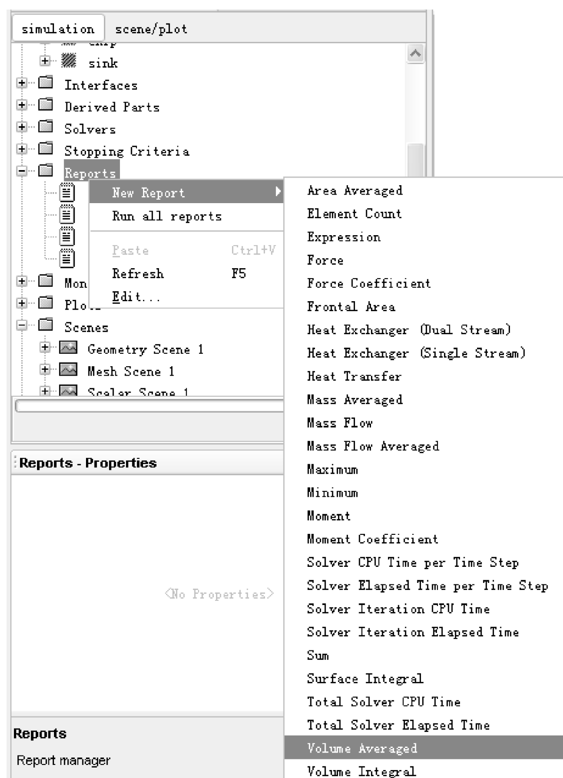


图 3-134　新建 Volume Averaged 1

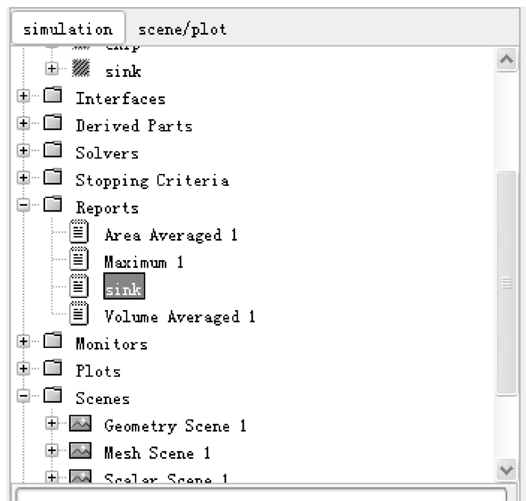


图 3-135　重命名 Volume Averaged 1

右键点击[Reports] > [sink]，选择[Create Monitor and Plot from Report]，如图 3-138 所示。可以看到，树形菜单[Monitors]下出现[sink Monitor]项，如图 3-139 所示。

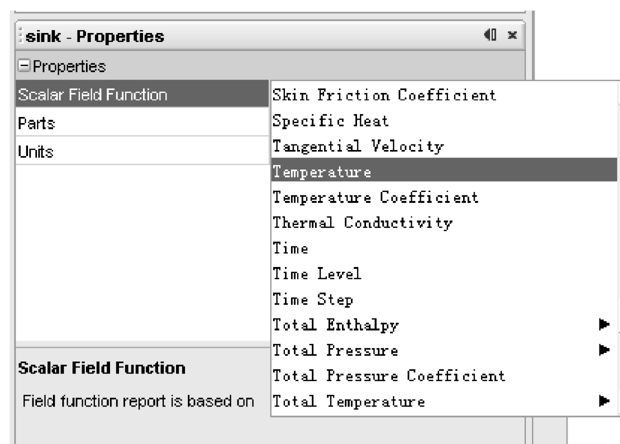


图 3-136 选择温度作为分析变量

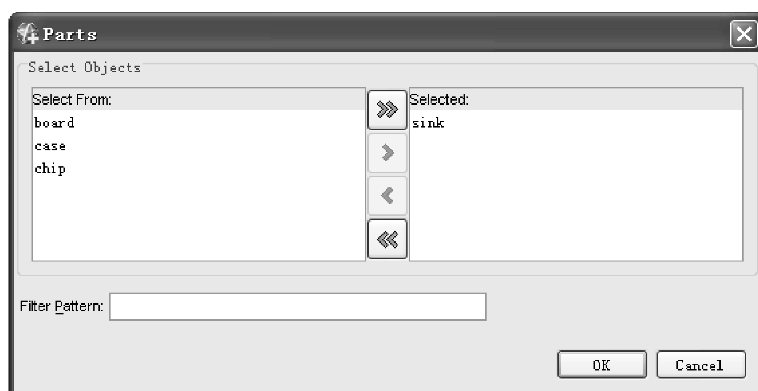


图 3-137 选择“sink”

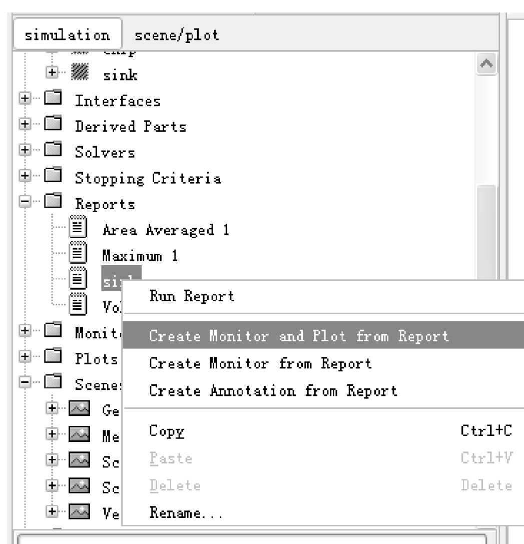


图 3-138 选择 Create Monitor and Plot from Report

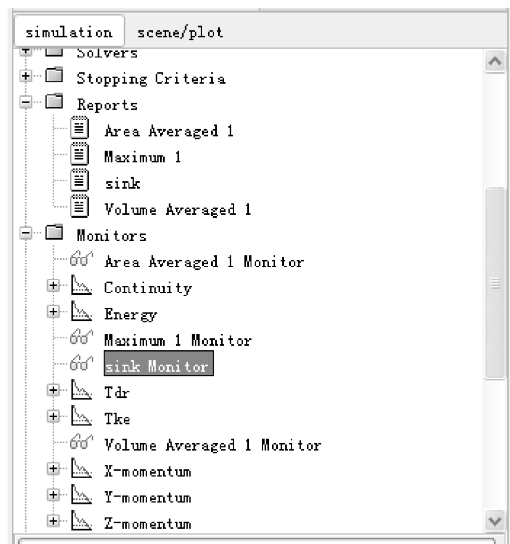


图 3-139 sink Monitor 选项

点击[Monitors] > [sink Monitor]，更改属性栏中的“Trigger”项为“Time Step”，如图 3-140 所示。

右键点击[Plots] > [sink Plot]，选择[Open]打开图表，如图 3-141 所示。可以看到随着计算的进行，每时刻散热器的平均温度，如图 3-142 所示。

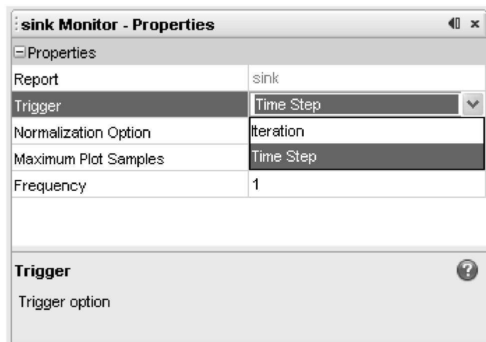


图 3-140　将 Trigger 设置为 Time Step

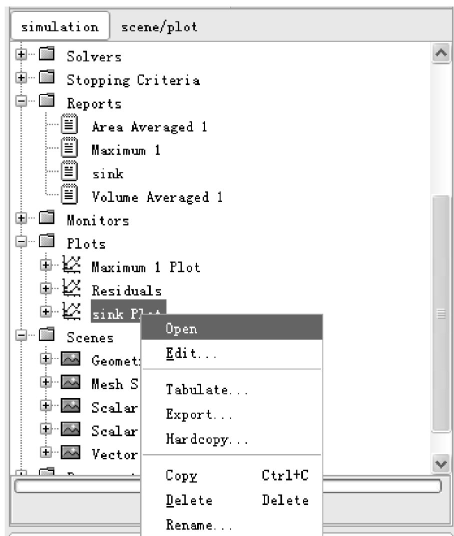


图 3-141　打开图表

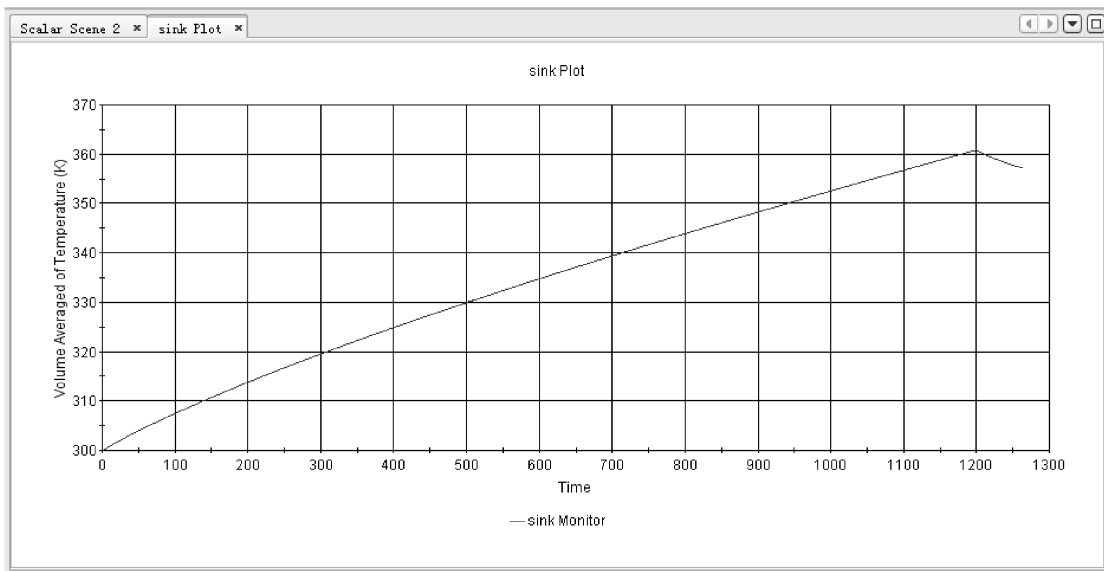


图 3-142　散热器的平均温度曲线

3.4.7　窗口文本显示设定

点击[Scenes] > [Vector Scene 1]属性栏中的“Annotations”项，如图 3-143 所示。

点击“Annotations”项右侧的按钮[...]，弹出“Annotations”对话框，如图 3-144 所示。

从“Select Objects”栏中选取“Iteration”、“Physical Time”和“Time Level”，在视图窗口中增加显示这三项文本。

视图区的文本显示如图3-145所示。

其他的窗口显示也可用同样的办法实现。

选择［Tools］>［Annotations］>［Iteration］，如图3-146所示。

在属性栏中的“Height”项输入值0.08，改变字体大小，如图3-147所示。

按照同样的方法设置“Physical Time”

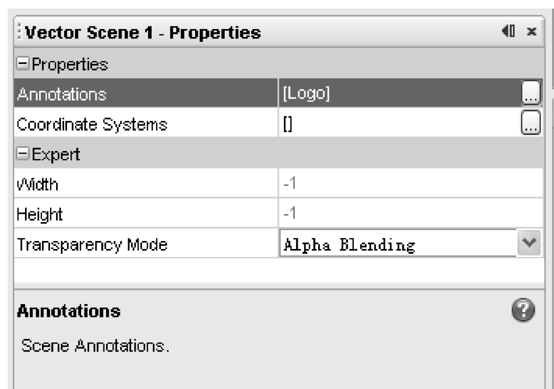


图3-143 Annotations选项

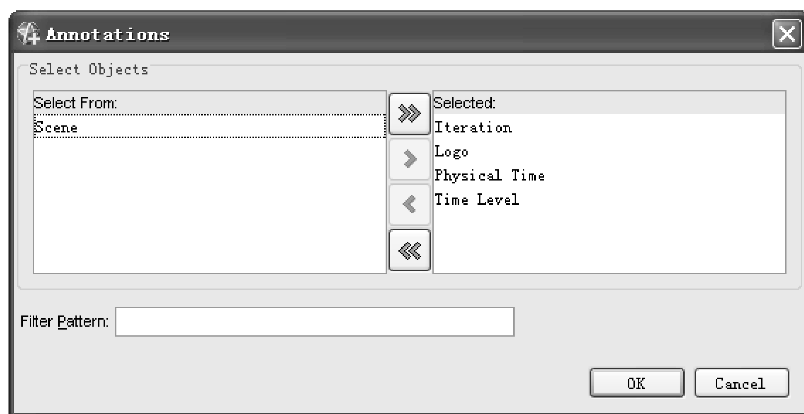


图3-144 “Annotations”对话框

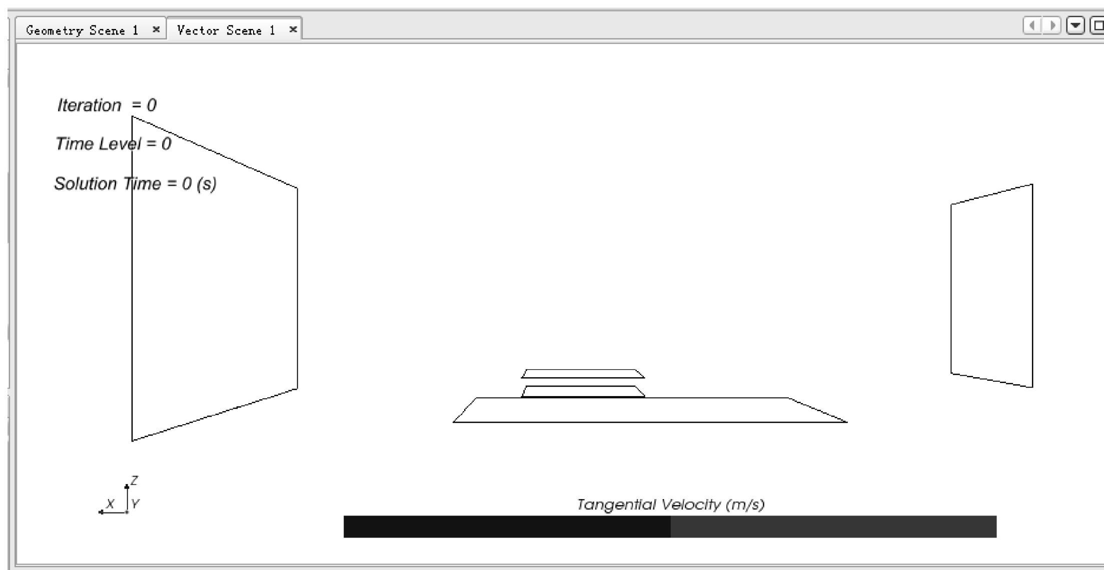


图3-145 视图区的文本显示

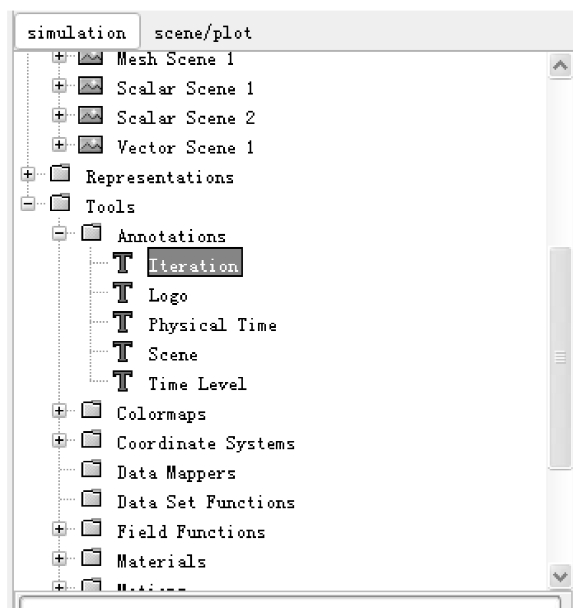


图 3-146　Iteration 选项

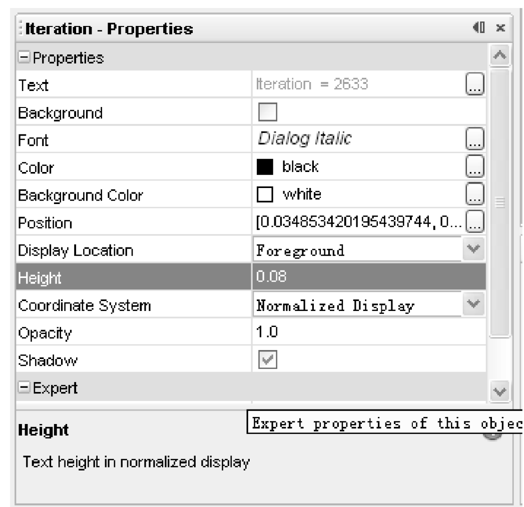


图 3-147　改变字体大小

和“Time Level”两项。视图区字体改变后的文本显示如图 3-148 所示。

点击和拖动文本，可移动到合适的位置。

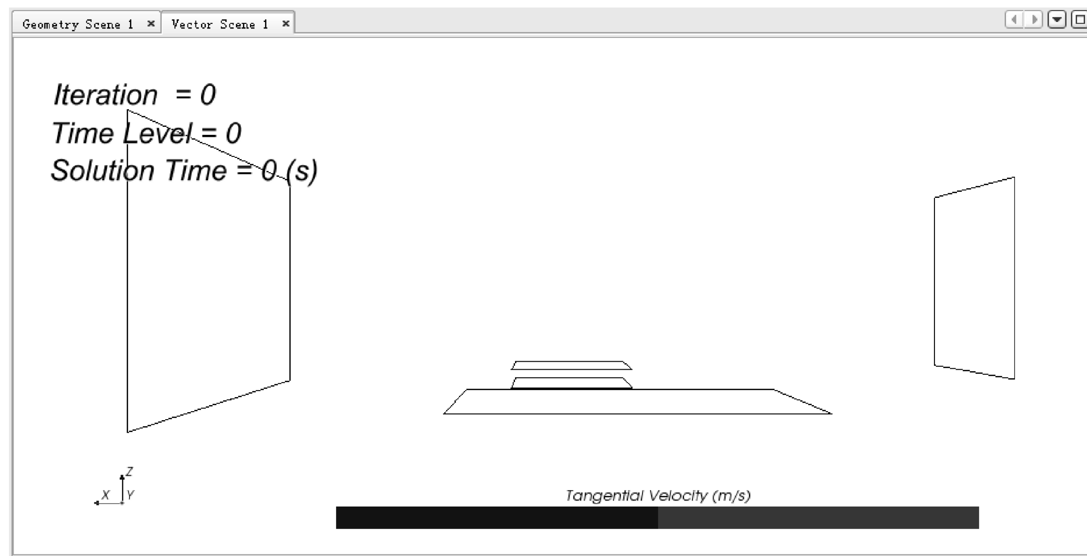


图 3-148　字体改变后视图区的文本显示

3.4.8　非定常显示输出的设定

点击[Scenes] > [Scalar Scene 2] > [Attributes] > [Update]，选择非定常显示输出项，如图 3-149 所示。

在属性栏中的“Update Frequency”项中输入值 10，如图 3-150 所示。

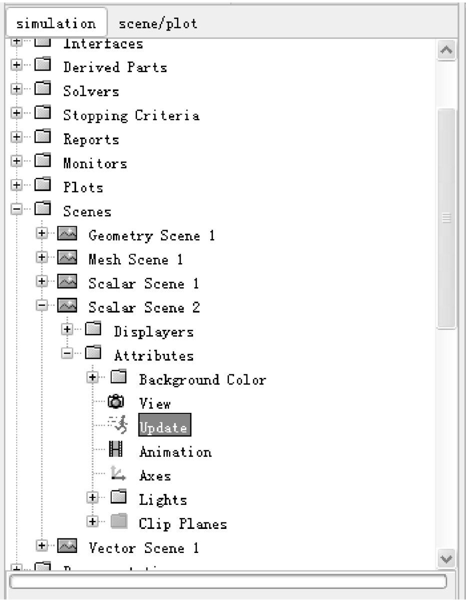


图 3-149　选择非定常显示输出项

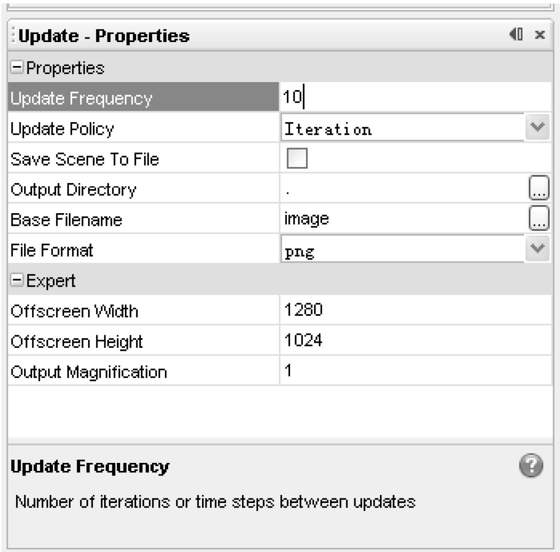


图 3-150　Update Frequency 选项

在属性栏中的“Update Policy”项中选择“Time-Step”项，选择时间步长的方式，如图 3-151 所示。

如图 3-152 所示，选择“File Format”项为“png”。修改图片尺寸，将“Expert”栏中的“Offscreen Width”值设置为 600，将“Offscreen Height”值设置为 500。

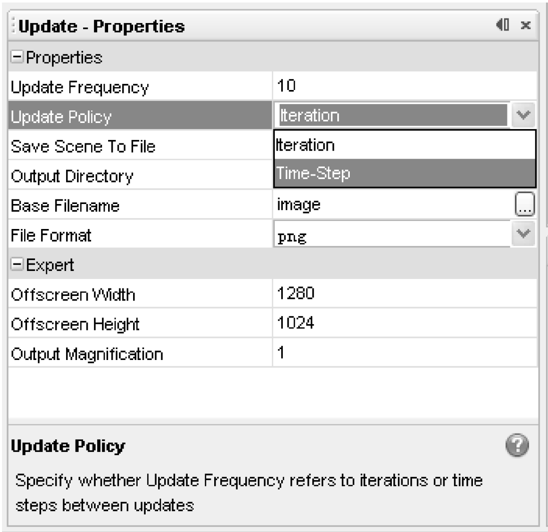


图 3-151　选择时间步长的方式

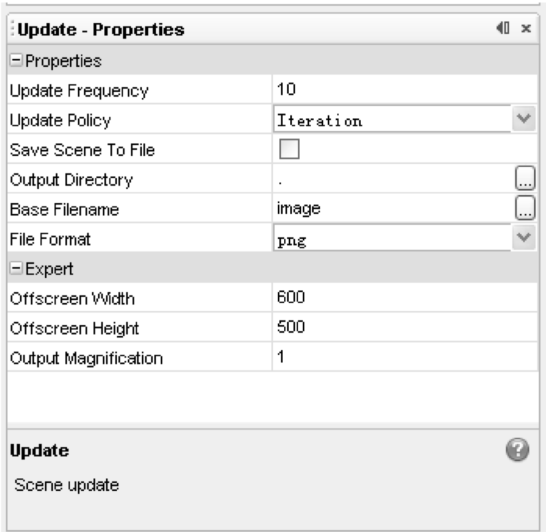


图 3-152　修改图片尺寸

点击“Output Directory”栏右侧按钮[...]，弹出图 3-153 所示的“Update-Output Directory”对话框，选择相应的文件夹作为保存路径。

点击“OK”按钮，属性栏中的“Output Directory”项中出现文件保存的地址，如图 3-154 所示。

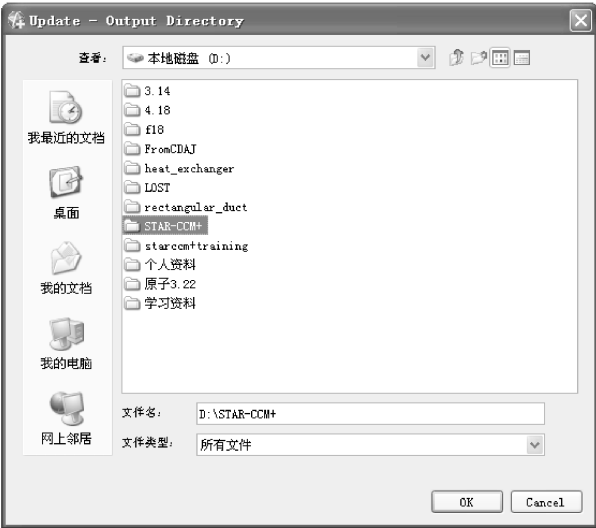


图 3-153　选择保存路径

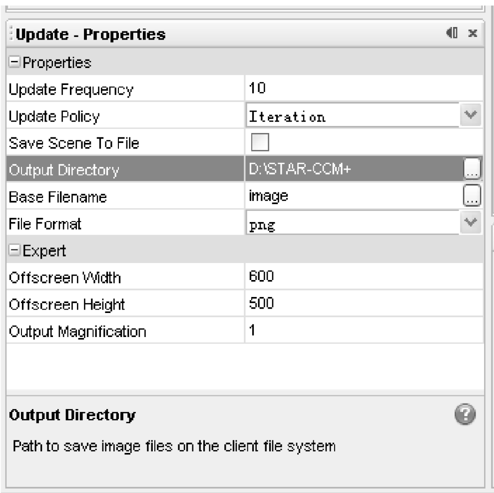


图 3-154　文件保存地址

开始计算后，文件夹定时增加一幅图片，如图 3-155 所示。待计算完成后，可以将这些图片制作成动画。

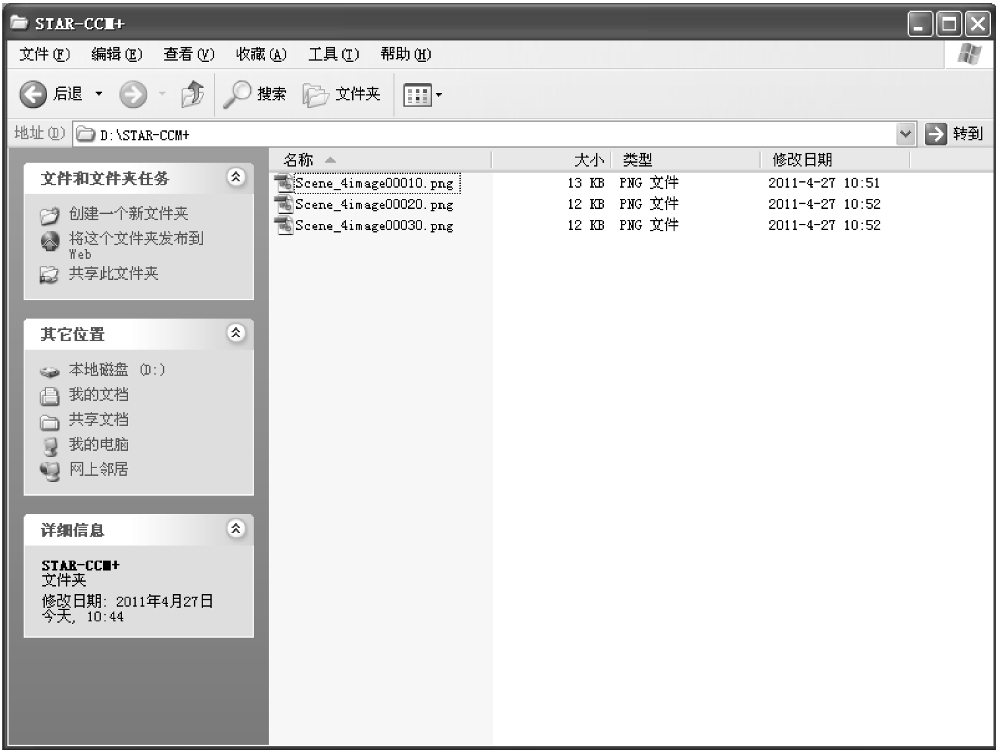


图 3-155　文件夹中的图片

也可以在软件中实现流线的动画显示。双击打开[Scenes] > [Geometry Scene 1]，在该视图中实现流线。右键点击[Derived Parts] > [New Part] > [Streamline...]，新建 Streamline，

如图 3-156 所示。如图 3-157 所示，选择“Seed Mode”项为“Part Seed”模式，在“Seed Parts”项中选择“case：cas _ in”，即选择空气入口作为流线起始端。

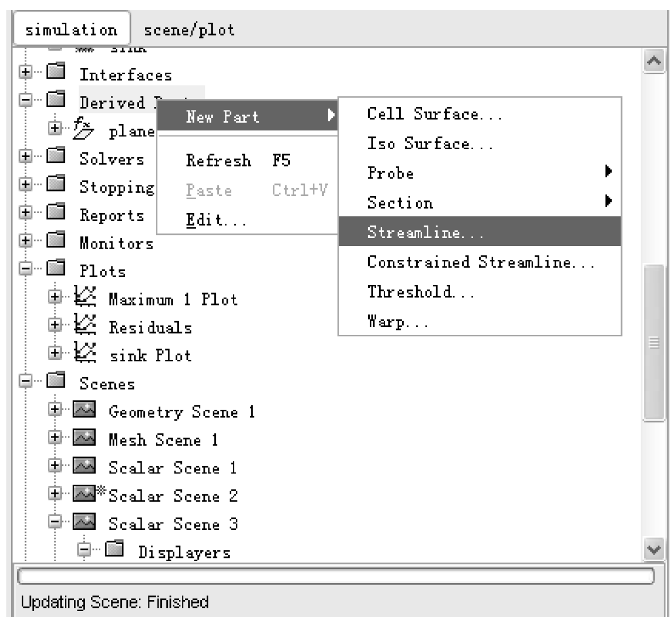


图 3-156 新建 Streamline

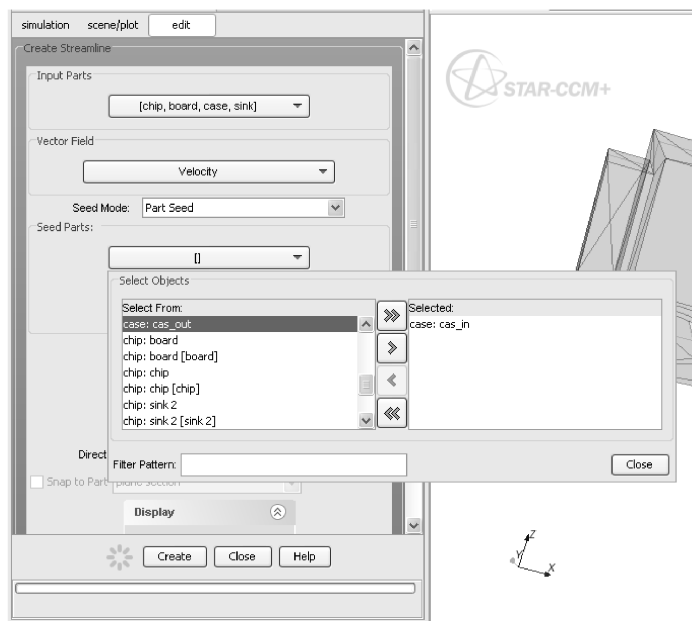


图 3-157 选择空气入口作为流线起始端

如图 3-158 所示，设置“Part U-Resolution”和“Part V-Resolution”项均为 20，即选择入口处流线在横向和竖向各 20 条流线。

点击“Create”按钮，生成流线。点击“Close”按钮返回视图区。

选择[Scenes]>[Geometry Scene 1]>[Displayers]>[Streamline Stream1]>[Scalar Field]，选择属性栏中“Function”项为“Temperature”，将流线显示为视图区中的温度方式。

同时选择[Scenes]>[Geometry Scene 1]>[Displayers]>[Streamline Stream1]>[Animations]，将属性窗口中“Animation Mode”项选择为“Tracers”方式，如图 3-160 所示。如图 3-161 所示，工具栏上的动画播放按钮▶生效。

选择[Scenes]>[Geometry Scene 1]>[Displayers]>[Streamline Stream1]>[Animations]>[Streamline Settings]，修改属性栏中的各项设置，如图 3-162 所示。设置完成后，点击播放按钮▶，即可开始播放动画，如图 3-162 所示。

注意：在输出动画之前，至少要点击过

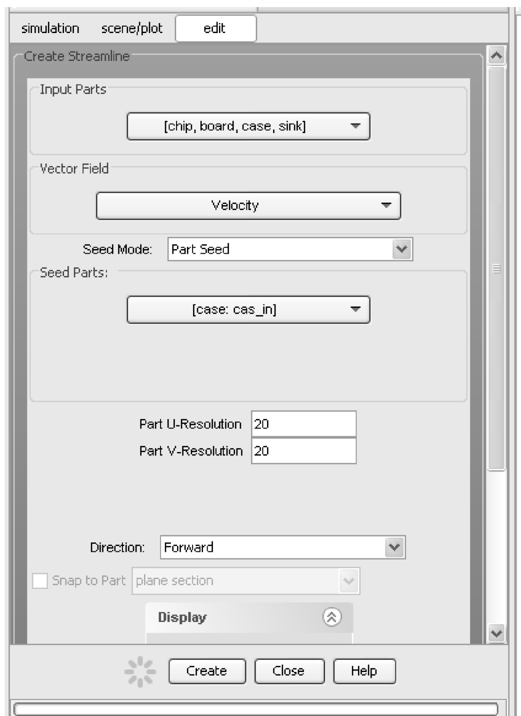


图 3-158　设置流线数目

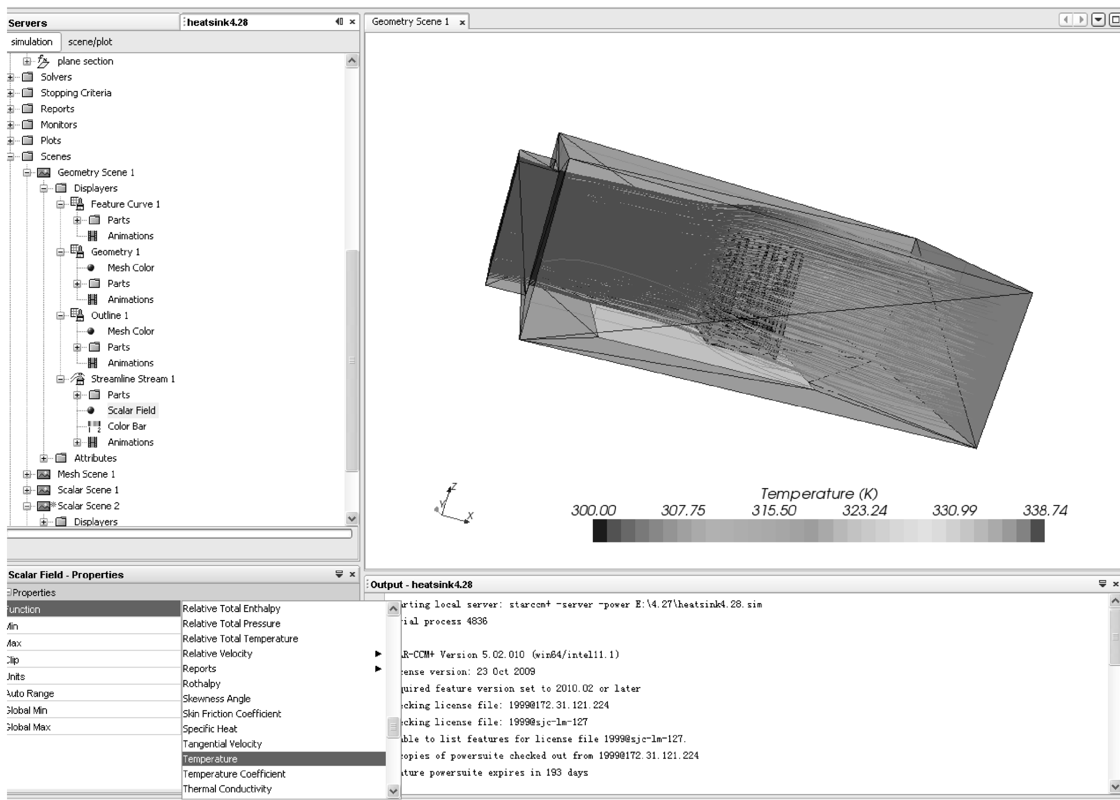


图 3-159　将流线显示为温度方式

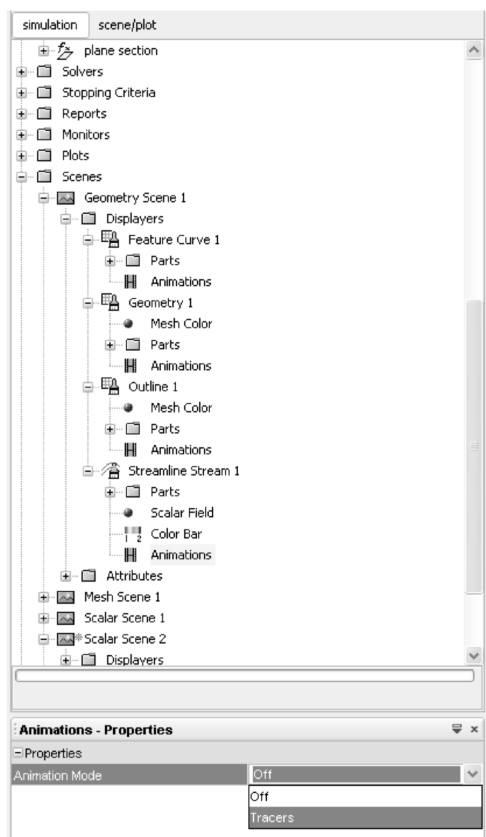


图 3-160 设置动画方式

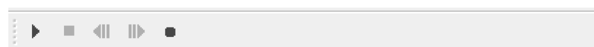


图 3-161 动画按钮生效

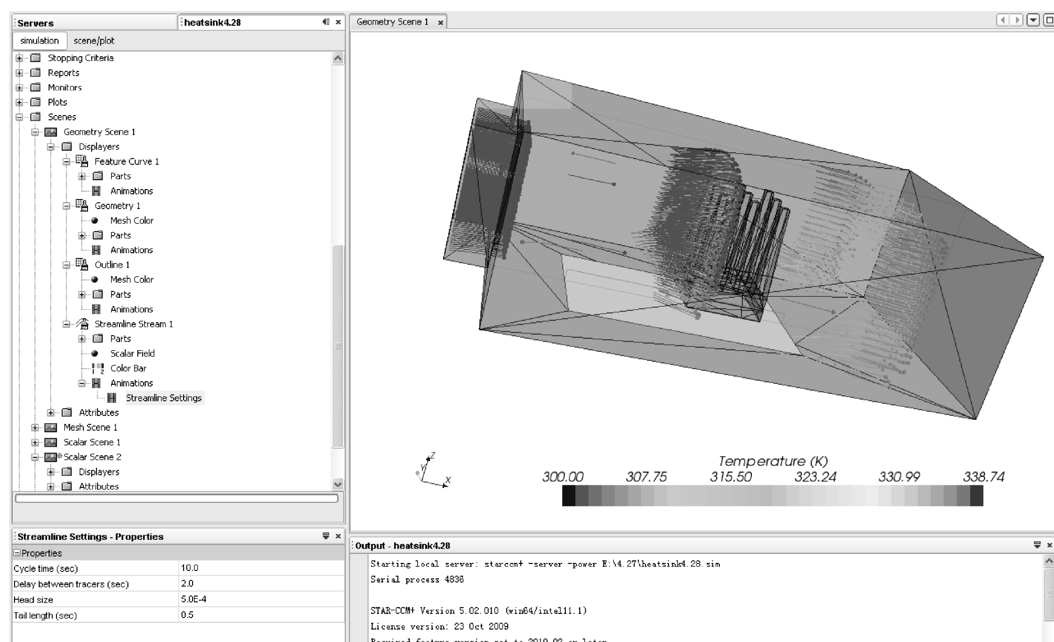


图 3-162 播放动画

一次播放按钮且完成一次动画显示，确认后才能输出动画。

点击工具栏按钮，停止动画播放，同时动画保存按钮生效，如图 3-163 所示。



图 3-163　保存按钮生效

点击工具栏的保存按钮，出现图 3-164 所示的对话框，保持默认设置，输入文件名“heatsink”，保存为“. avi”格式的动画文件。

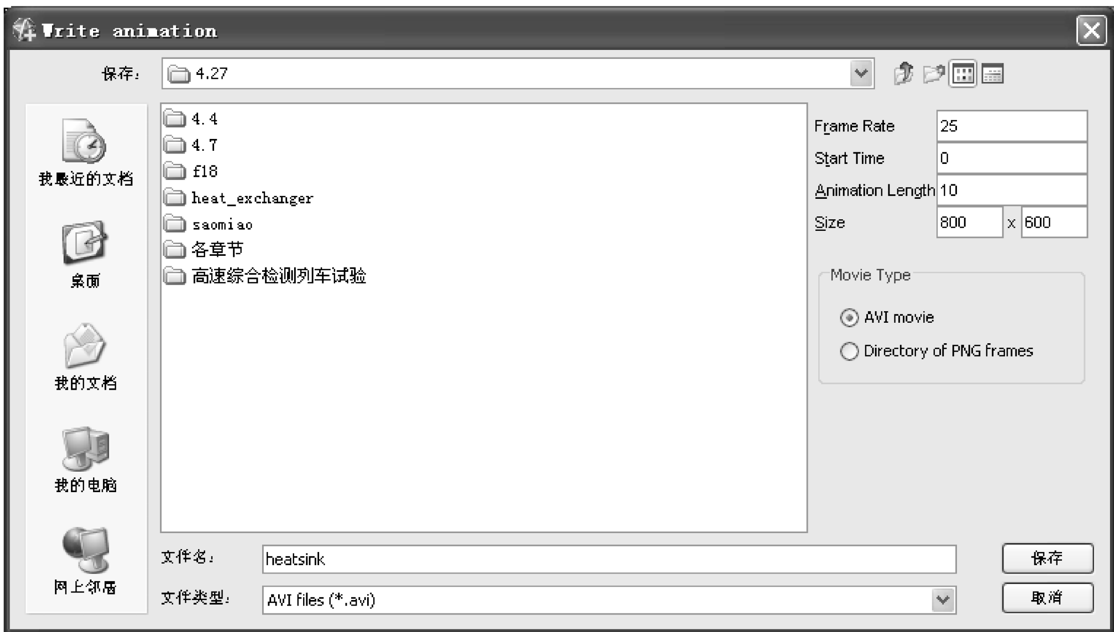


图 3-164　保存动画文件

3. 4. 9　计算结果曲线

1. 散热器平均温度曲线

散热器平均温度如图 3-165 所示。可以看出，在没有通风冷却的情况下，散热器平均温度逐渐升高；而到开始通风冷却以后，散热器平均温度逐渐降低，大致稳定在 338. 7℃左右。

2. 最大 Courant 数

最大 Courant 数曲线如图 3-166 所示。可以看出，在入口有空气流入后，最大酷瑞数从 0 迅速增大到 3000 多。在进一步的计算分析中，可以采用修改边界层网格、改变计算条件设置等措施，降低该值。

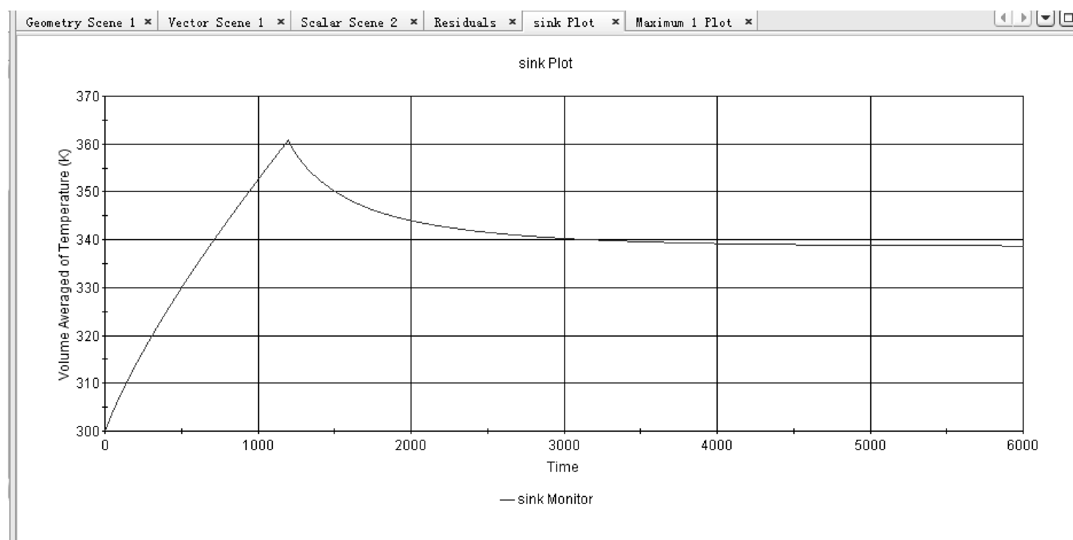


图 3-165 散热器平均温度曲线

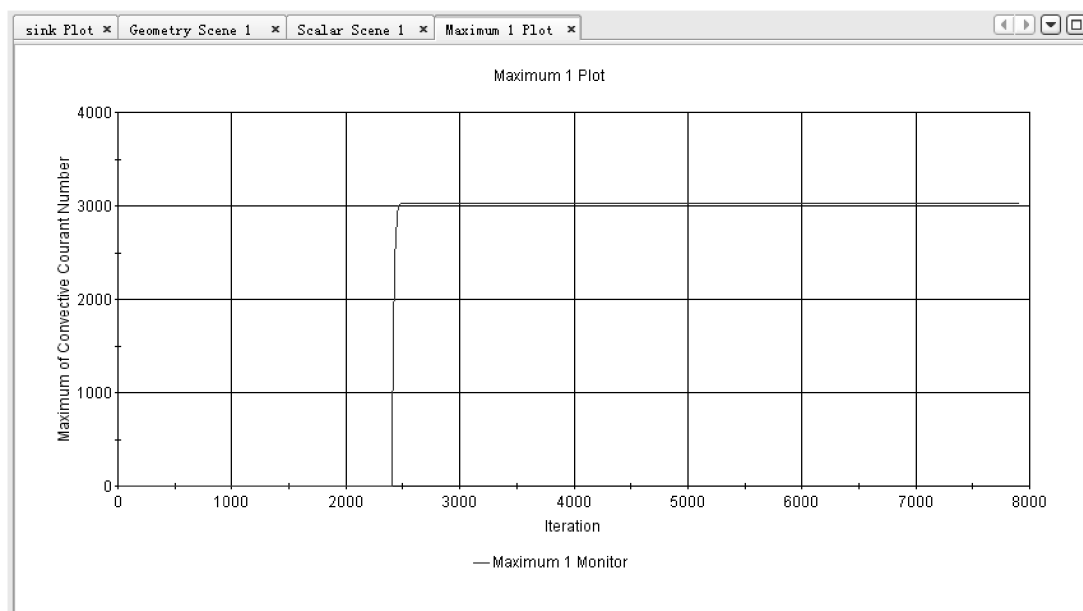


图 3-166 最大 Courant 数曲线

第 4 章　小汽车外流场计算

小汽车车身阻力及阻力系数含义如图 4-1 所示。

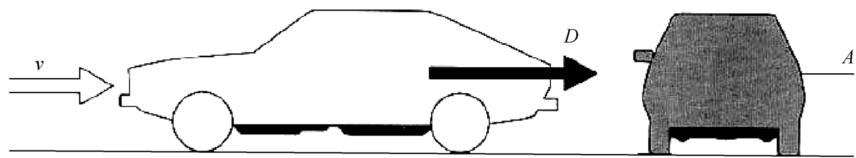


图 4-1　小汽车车身阻力及阻力系数含义

气动阻力计算公式为

$$D = \frac{\rho}{2} c_{\mathrm{D}} A v^2 \tag{4-1}$$

气动阻力系数计算公式为

$$c_{\mathrm{D}} = \frac{D}{\frac{\rho}{2} A v^2} \tag{4-2}$$

式中　D—— 气动阻力(N)；

c_{D}——气动阻力系数；

ρ——空气密度($\mathrm{kg/m^3}$)；

A——汽车迎风面积($\mathrm{m^2}$)；

v——汽车运行速度(m/s)。

4.1　模型处理及网格划分

本章小汽车模型处理、网格划分及求解的思路如图 4-2 所示。

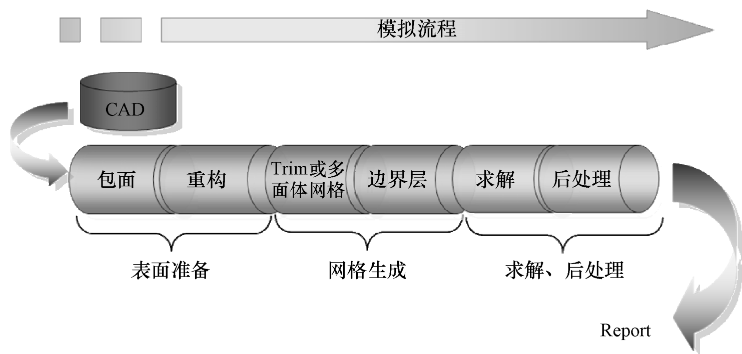


图 4-2　小汽车模型处理、网格划分及求解的思路

4.1.1　导入车体模型

点击[File] > [New]，新建仿真任务，弹出“Create a New Simulation”对话框，如图 4-3 所示。

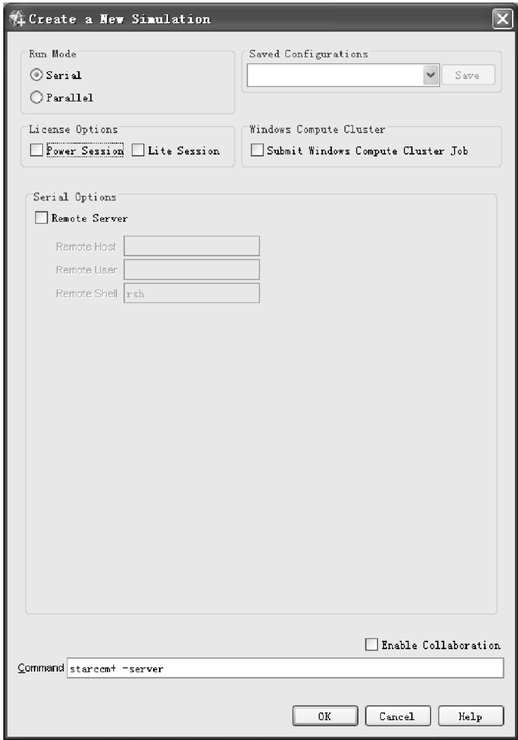


图 4-3　新建任务

在弹出的“Create a New Simulation”对话框中，在“Run Mode”运行模式栏中选择“Serial”单核运算方式，其他设置不变，点击“OK”按钮，完成新建任务。

点击工具栏上的“”按钮，在弹出的对话框中选择文件“car. dbs”，导入汽车模型，如图 4-4 所示。

点击“OK”按钮，弹出图 4-5 所示的对话框。将“Region Mode”项改为“One region for all files”，将整车作为一个区域显示。

由于汽车模型以 m 为单位，“Units”采用默认设置即可，点击“OK”按钮，完成车体文件导入。导入后的汽车如图 4-6 所示。

点击工具栏按钮，选择“Mesh On”，则导入后的汽车 import 网格如图 4-7 所示。

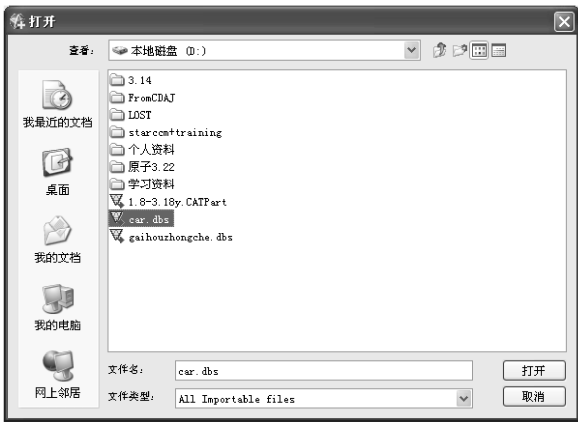


图 4-4　导入汽车模型

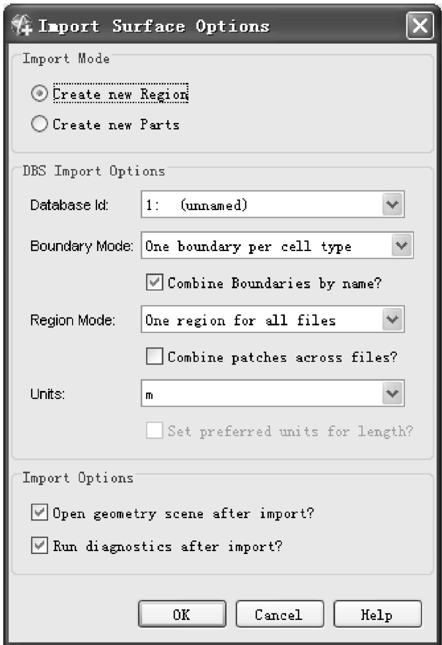


图 4-5　更改 Region Mode 项

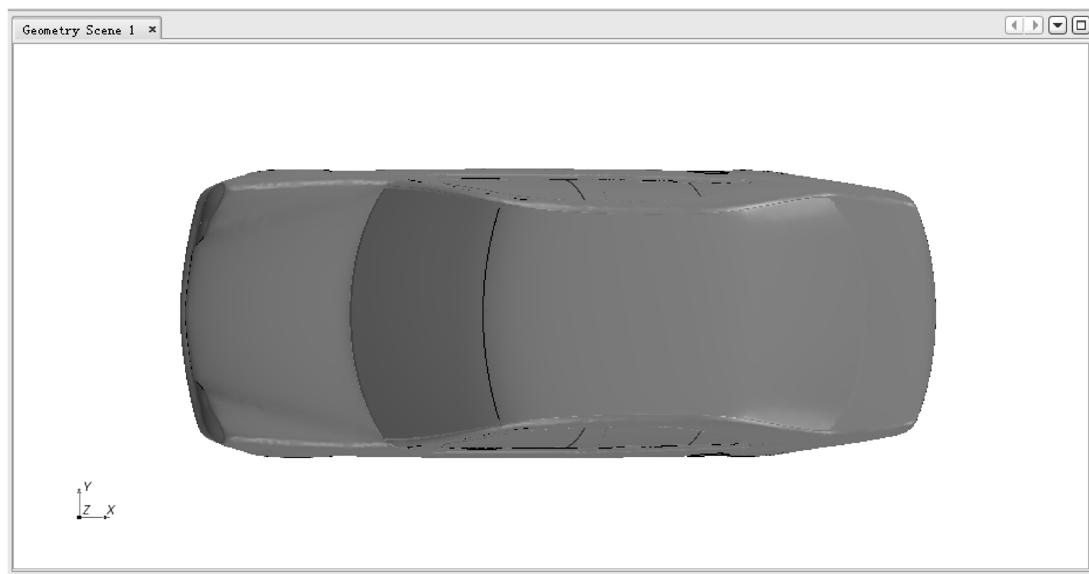


图 4-6　导入后的汽车

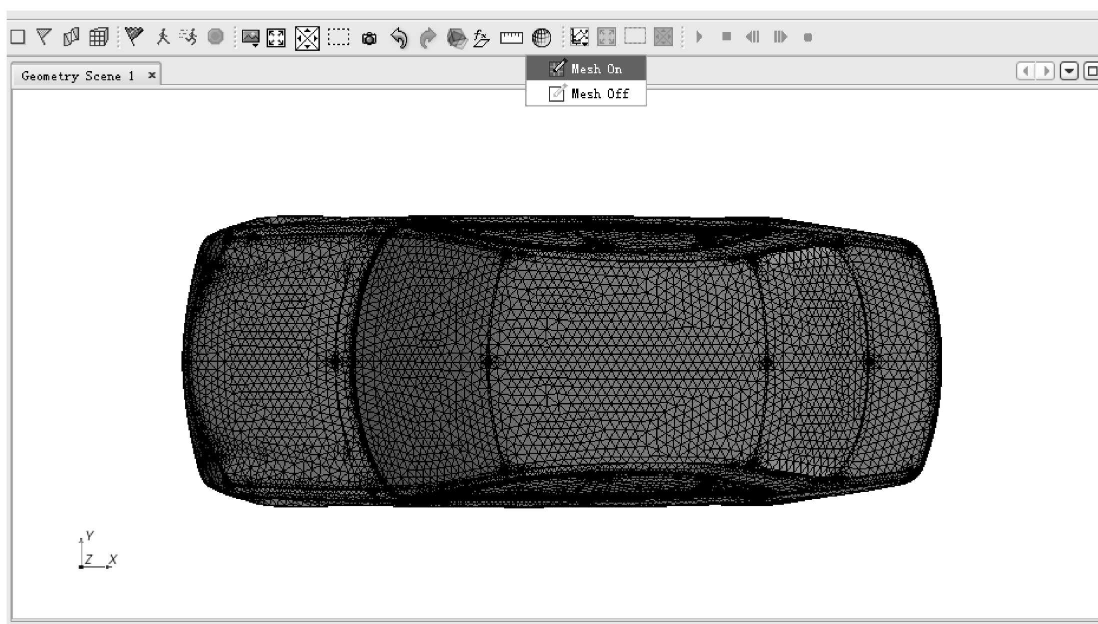


图 4-7　导入后的汽车 import 网格

4.1.2　包面前的模型处理

1. 包面尺寸设置

首先选择“Surface Wrapper”工具，包面时可采用较小尺寸，以保证局部特征的网格精细化，如图 4-8 所示。

包面网格尺寸采用表 4-1 中的数据。

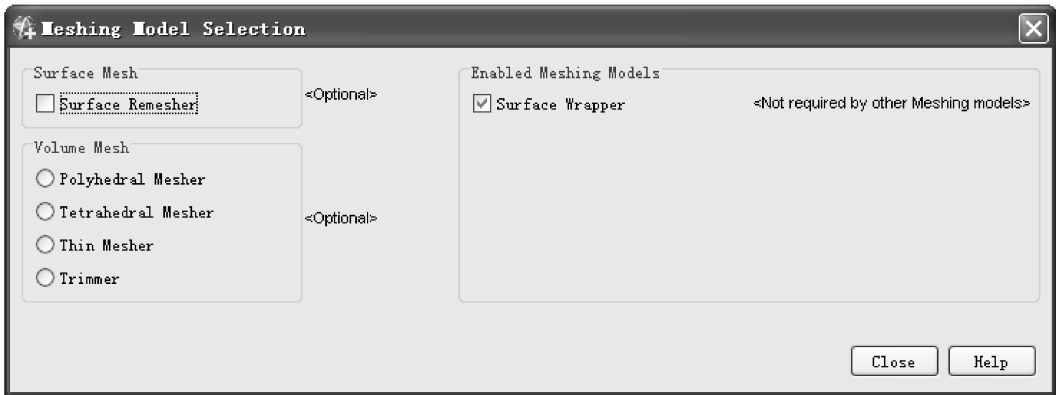


图 4-8 选择包面工具

表 4-1 面网格尺寸设置

	Relative Target Size（相对目标尺寸）	Relative Minimum Size（相对最小尺寸）	Base Size（基本尺寸）
包面网格	0.01m	0.005m	1m
重构网格	0.02m	0.01m	1m

注意，此处先设置包面网格尺寸，以便确定后文漏洞检查的尺寸。车体漏洞检查的标准以包面的最小尺寸为准，即尺寸大于包面最小尺寸的孔，都会被检查到。检查漏洞并进行修补，以保证包面时提取车体最大外表面特征，不会涉及车体内部特征。

2. 包面前的漏洞检查

右键点击[Continua]>[Mesh 1]>[Models]>[Surface Wrapper]>[Run leak detection...]，进行包面前的漏洞检查，如图 4-9 所示。

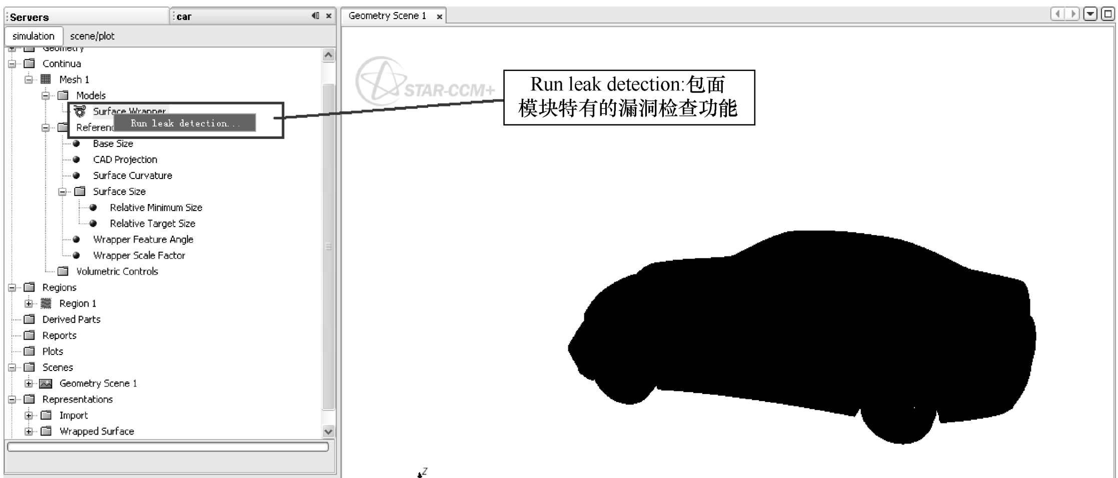


图 4-9 漏洞检查工具

视图区变化为图 4-10 中的形式。调整视图区中车体方位，以方便定位源点和目标点。如图 4-10 所示，车体位置选择工具栏按钮 > [Standard Views] > [(+Z) top]。

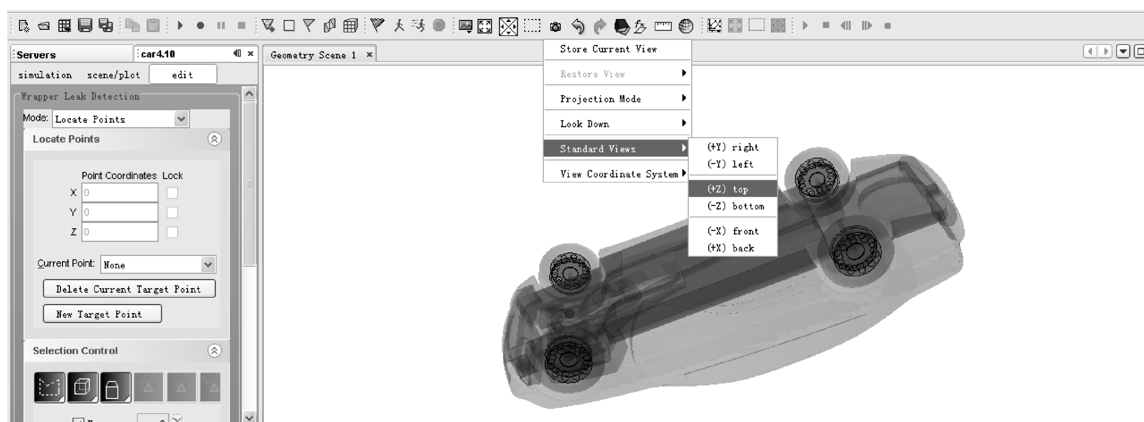


图 4-10　调整视图区车体方位

小汽车变换为图 4-11 的形式。选择“Current Point”项为“Source Point”，切换到源点定位工具中，可以看到视图区中的红点即为源点。可以确认在“X”和“Y”两个方向上，源点均落在车体范围内。

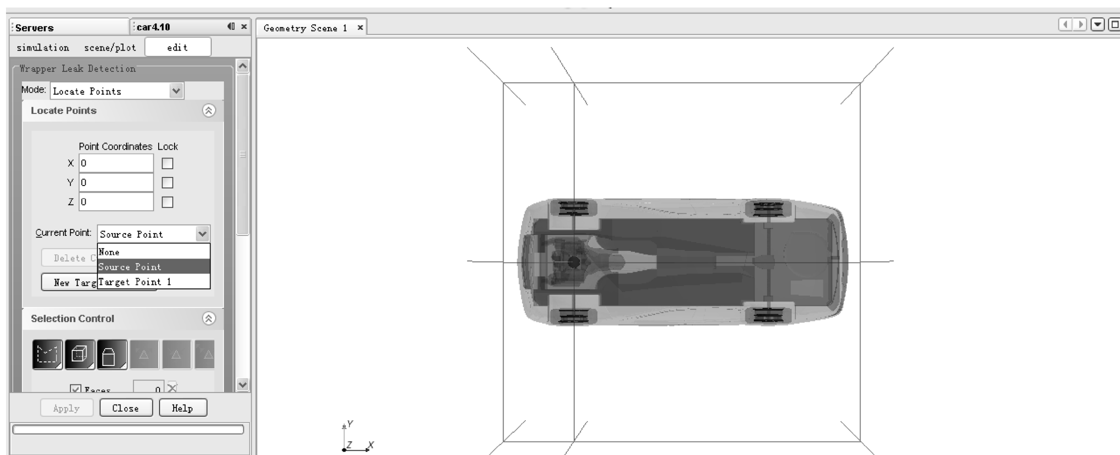


图 4-11　定位源点

如图 4-12 所示，选择工具栏按钮 > [Standard Views] > [(+Y) right]，调整“Z”方向上源点的位置。

如图 4-13 所示，源点位于车头下部车轮附近。

单击源点，红色的源点会变大。将源点拖拽至车体中部，拖拽路径如图 4-14 所示。

如图 4-15 所示，选择“Current Point”项为“Target Point 1”，切换到目标点定位工具中。可以看到视图区中的红点即为目标点，而此时源点变为蓝色，如图 4-16 所示。

拖拽目标点至车体范围外，如图 4-17 所示。

源点和目标点设置完成后，点击左侧栏中的“Recompute Template + Path”按钮，开始

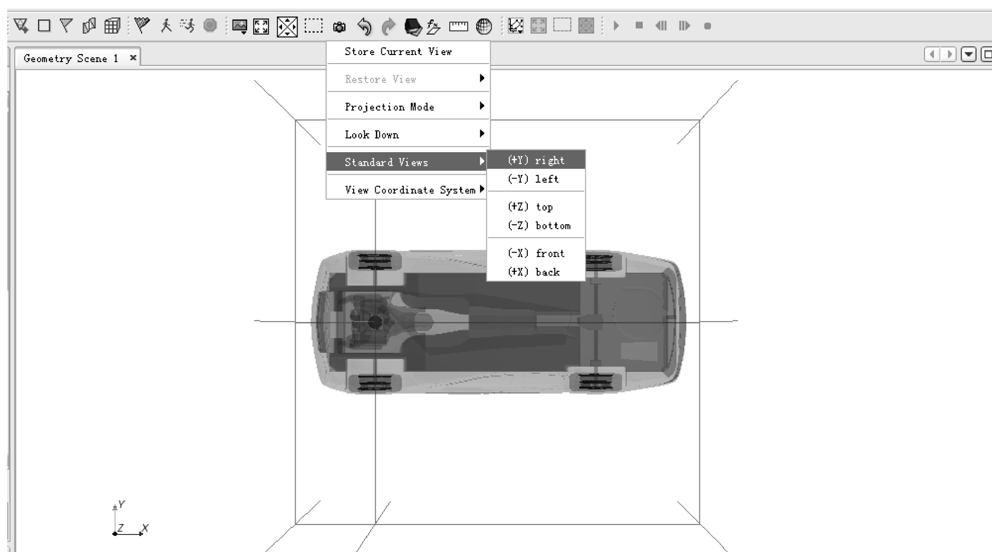


图 4-12　选择 +Y 方向

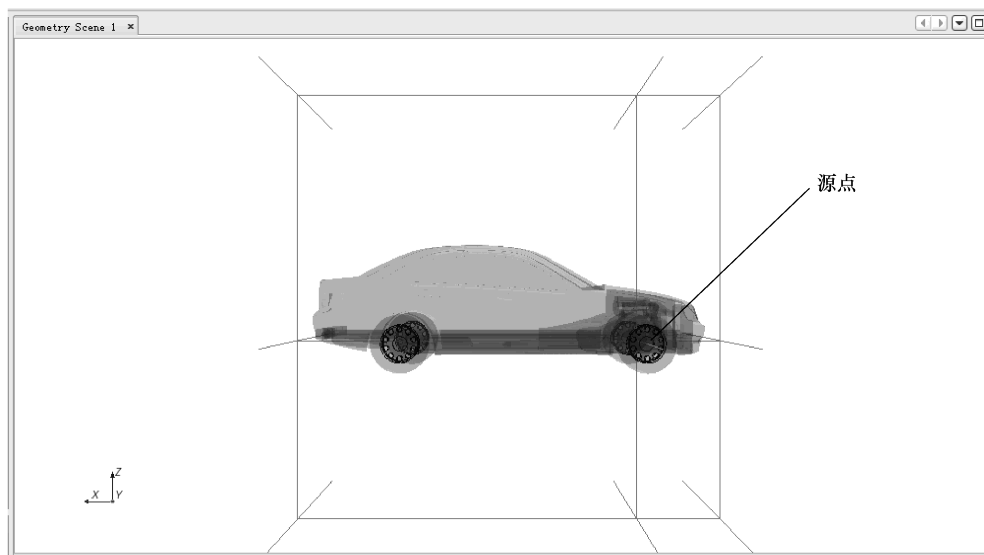


图 4-13　源点位置

检查车体外表面是否封闭，如图 4-18 所示。可以看出，淡黄色连接线即为车体内外的连接线。视图区下方的输出窗口中最后两行也显示出车体内外存在连接线。

点击工具栏按钮，取消透明化显示，旋转车体，可以看到车体底部存在漏洞，如图 4-19 所示。

3. 漏洞修补

退出漏洞检查工具，开始漏洞修补工作。

如图 4-20 所示，点击[Representation]>[Import]>[Repair Surface...]，对小汽车模型进行模型的漏洞修补处理。随后出现“Surface Preparation Options”对话框，如图 4-21 所示。

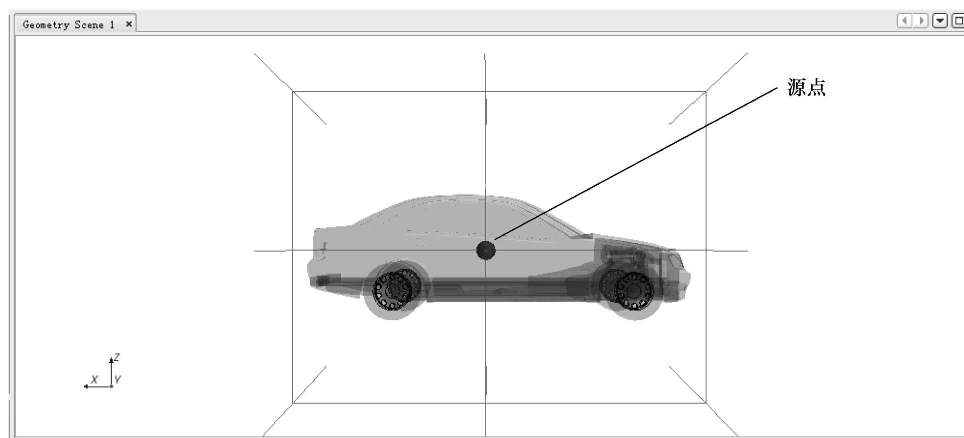


图 4-14　再次调整源点位置

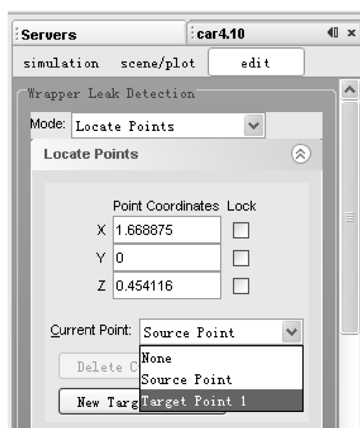


图 4-15　选择目标点

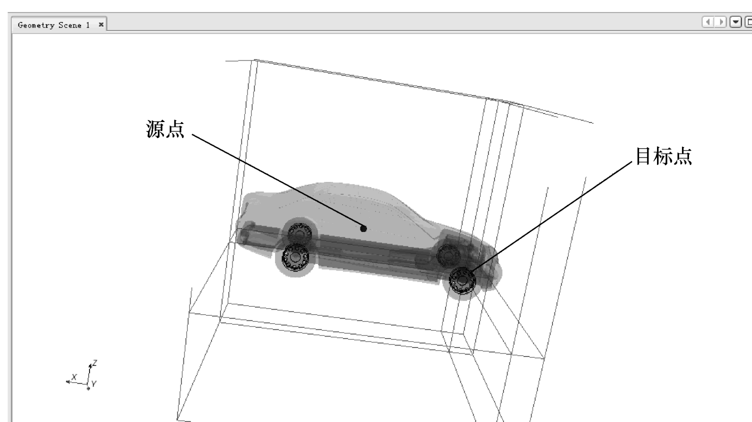


图 4-16　源点和目标点

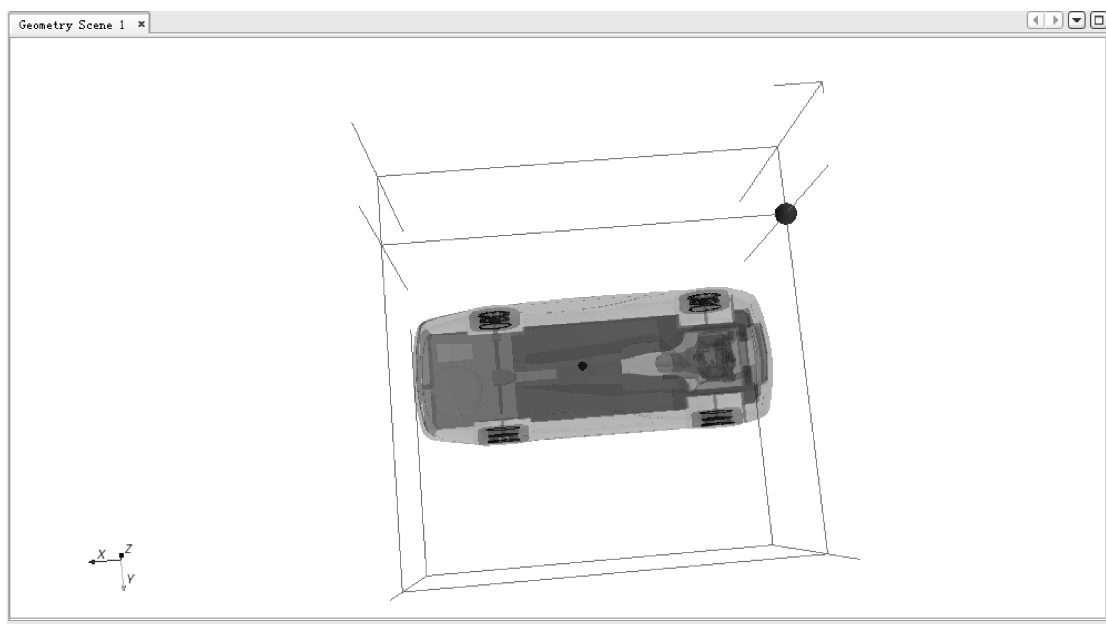


图 4-17　定位目标点

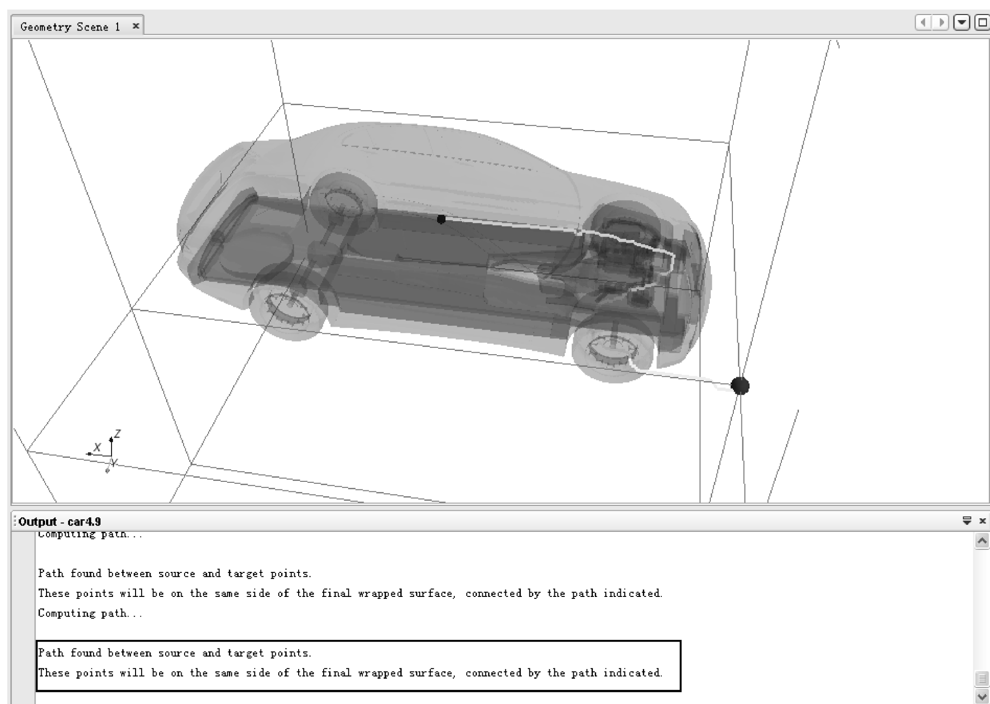


图 4-18 车内外存在漏洞

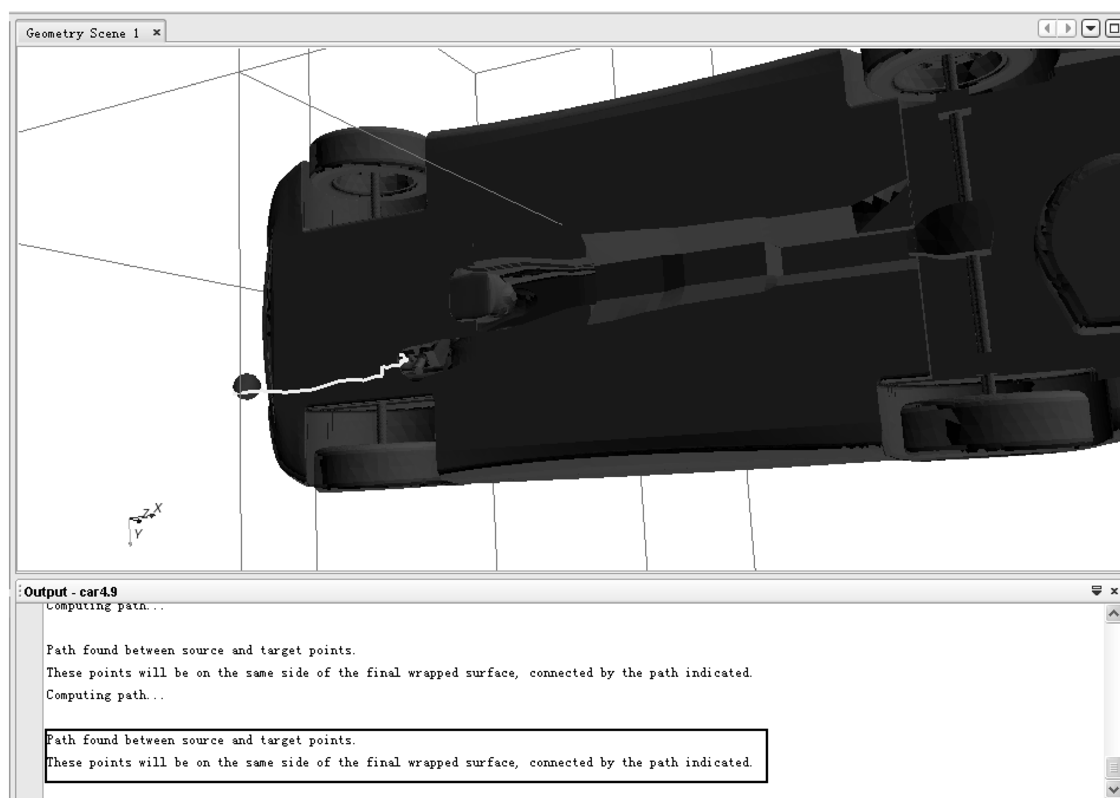


图 4-19 车体底部存在漏洞

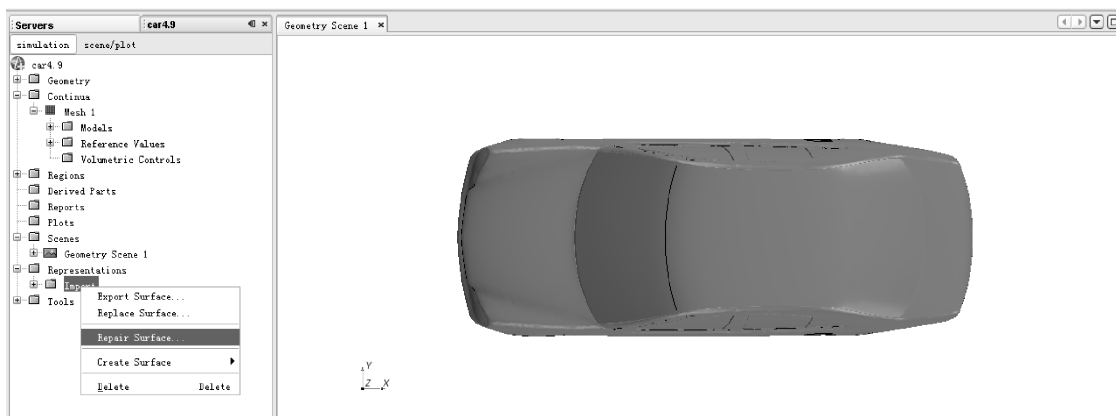


图 4-20　Repair Surface 选项

取消选择“Check All”项，所有选项被取消，如图 4-22 所示。由于模型有多个部位比较复杂(如车体底部)，可适当简化，取小汽车最大外表面进行空气动力学计算。

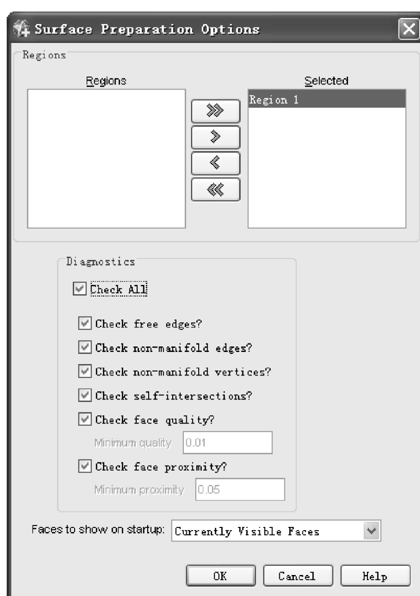


图 4-21　网格检查对话框

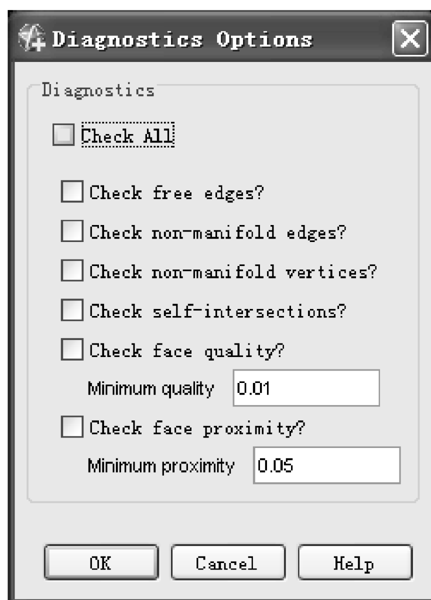


图 4-22　取消选择所有检查项

点击“OK”按钮，经过网格检查，出现图 4-23 左侧所示的检查结果。可以看出，各项指标均对应很多有问题的网格。由于此处仅进行模型 import 网格的修补操作，不用处理这些有问题的网格，留待包面和重构处理。

点击工具按钮，开始绘制封闭车体漏洞的多边形。点击鼠标左键，在车体底部逐点点击车体底部位置，如图 4-24 所示。

绘制完成的多边形如图 4-25 所示。

在最后一点处点击鼠标右键，完成多边形绘制。封闭完成后的车体底部如图 4-26 所示。

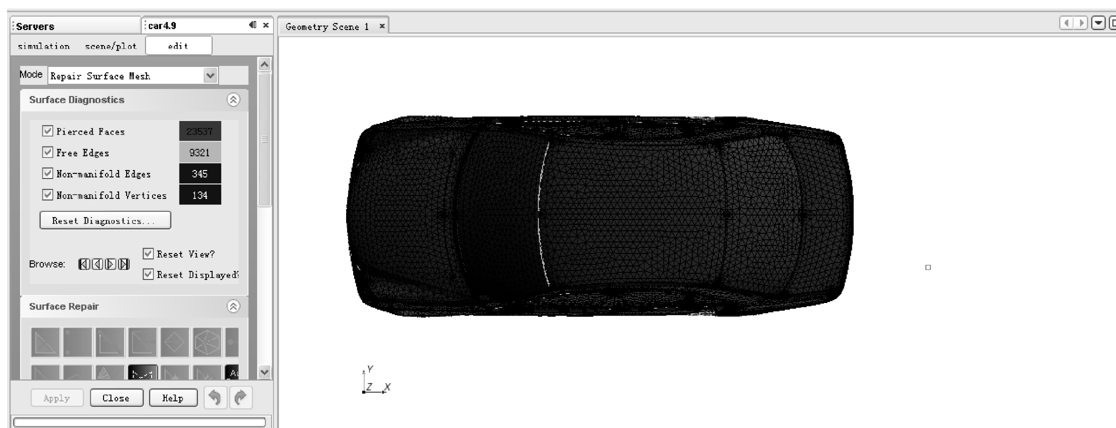


图 4-23 有问题的网格

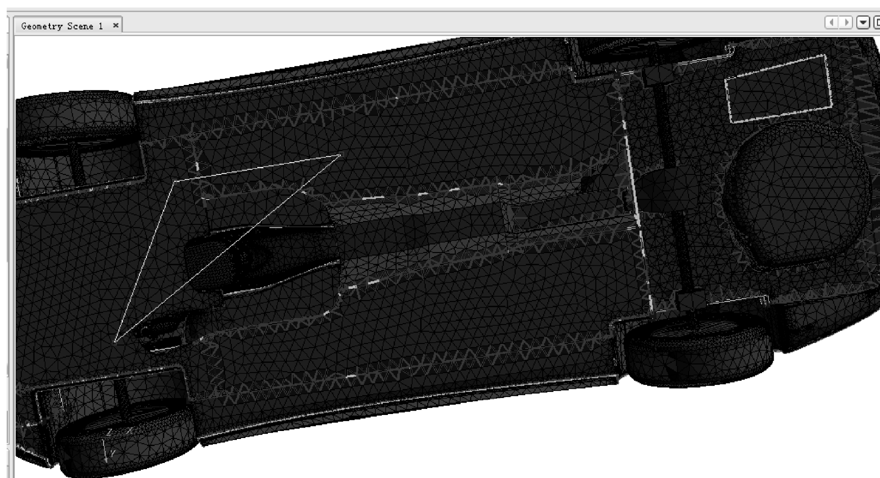


图 4-24 绘制封闭车体漏洞的多边形

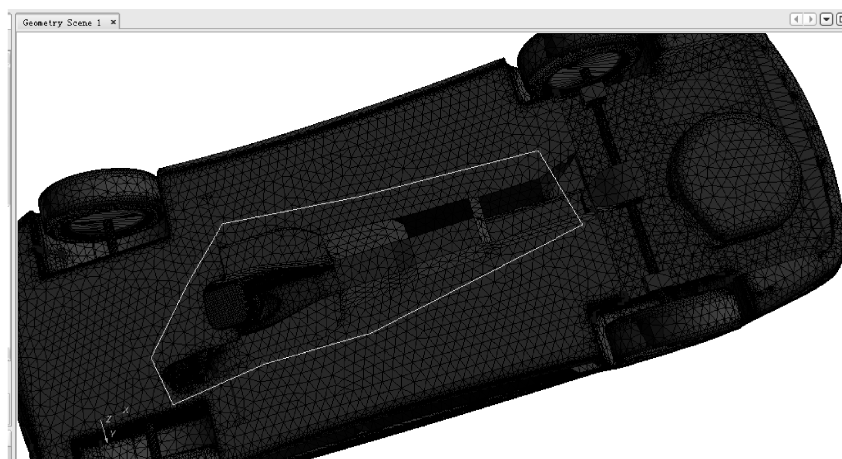


图 4-25 绘制完成的多边形

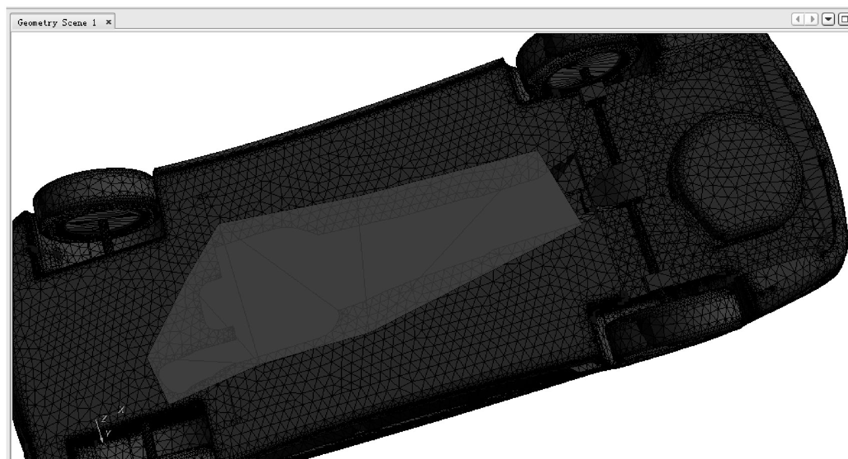


图 4-26　封闭完成后的车体底部

放大视图可以看到，已完成的多边形旁还有个小漏洞，绘制小多边形，如图 4-27 所示。至此，车体底部漏洞修复完毕。

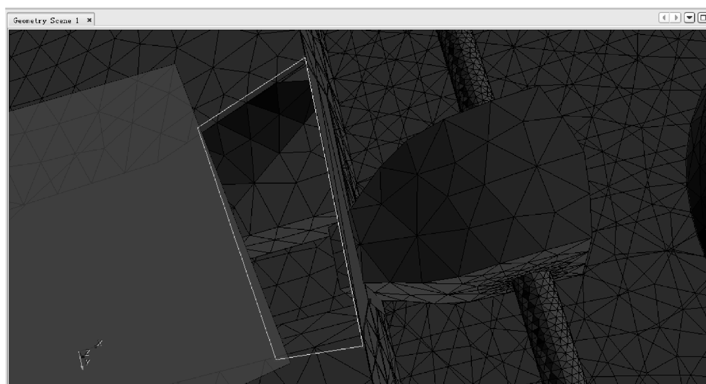


图 4-27　绘制小多边形

漏洞修补完成后的车体底部如图 4-28 所示。

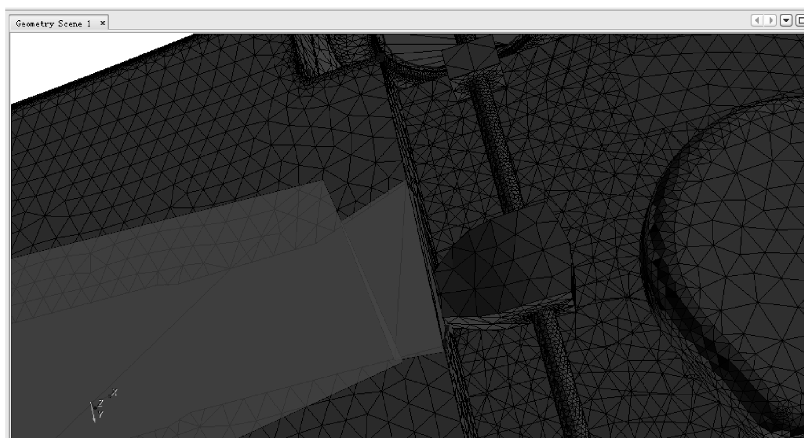


图 4-28　漏洞修补完成后的车体底部网格

车轮处存在很多圆孔，可封闭所有圆孔，以简化模型。双击选择图4-29中的圆孔周边（白色），点击工具栏按钮，或键盘上的“H”键，进行Fill Hole操作。操作完成后，修补好的圆孔网格如图4-30所示。

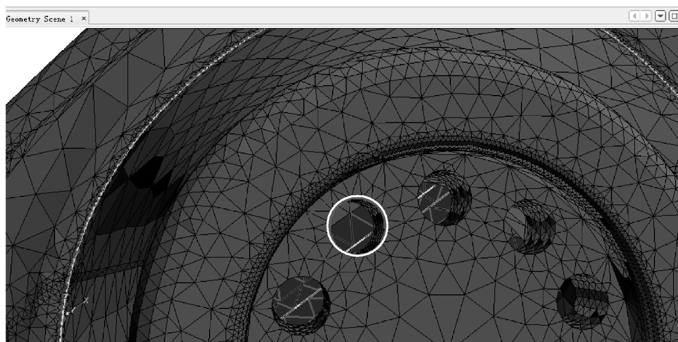


图4-29 选择圆孔周边

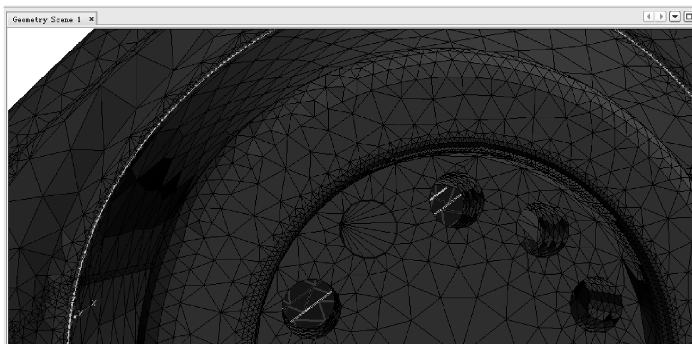


图4-30 修补好的圆孔网格

重复以上操作，修补其他圆孔。

本例也可以采用特征线修补的方式进行模型处理，如图4-31所示，右键点击[Regions]>[Region 1]>[Feature Curves]>[New Feature Curve]>[Mark Edges...]，进行特征线标示操作。在弹出的对话框中，双击左侧“Boundaries”栏中的“Region 1-Tires”，“Region 1-Tires”被选入右侧“Selected”栏中，如图4-32所示。

也可以单击选择“Boundaries”栏中的“Region 1-Tires”，点击按钮，将“Region 1-Tires”被选入右侧“Selected”栏中。

其余选项采用默认设置，点击“Apply”按钮，生成“Region 1-Tires”的特征线。如图4-33所示，[Regions]>[Region 1]>[Feature Curves]项目下面出现“Feature Curve”项，点击“Feature Curve”项，视图区出现的紫色线条即为车轮对应的特征线。

如图4-34所示，右键点击[Regions]>[Region 1]>[Feature Curves]>[Feature Curve]>[Edit Existing Edges in Current Scene]，编辑车轮的特征线。

如图4-35所示，视图区中车轮的特征线变为黄色线条。

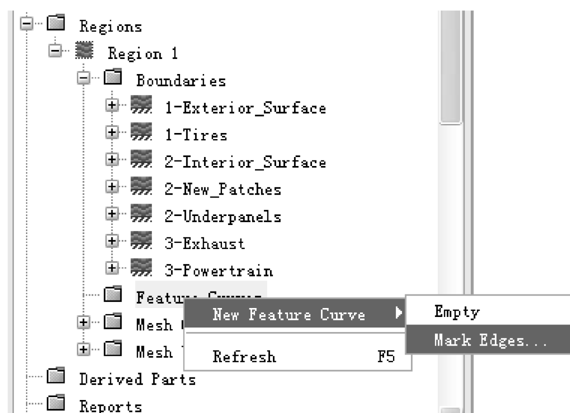


图 4-31　特征线标示

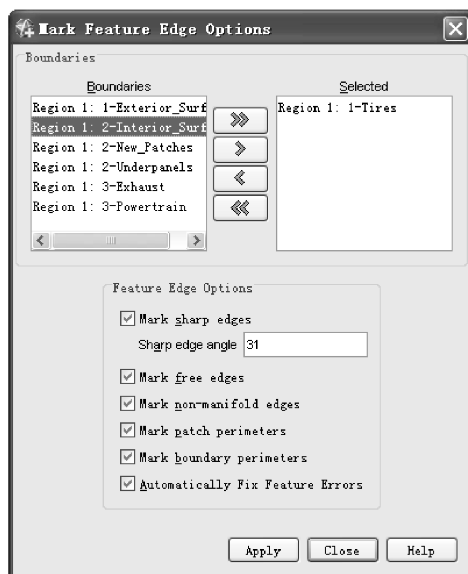


图 4-32　选择车轮对应的 region

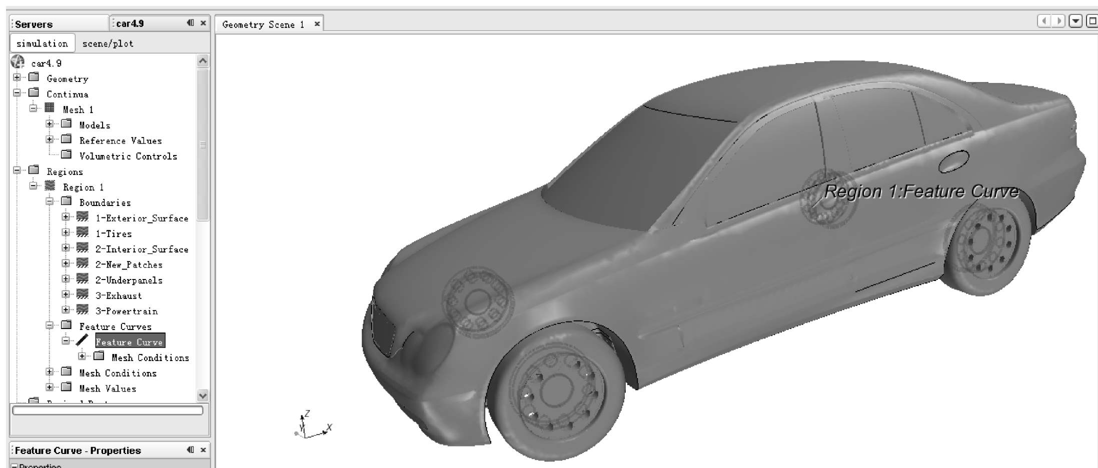


图 4-33　车轮的特征线

如图 4-36 所示，选择“Select Connected Edges”项，即单击鼠标左键可选中一条连续的特征线。单击即可选中如图 4-37 所示的特征线，按着“Ctrl”键，重复此操作可以选择四个车轮的两侧共 8 条特征线。

点击图 4-36 中的“New Curve From Selected”按钮，将这 8 条特征线独立显示出来。点击“Close”按钮，可以看到[Regions] > [Region 1] > [Feature Curves]下出现新的[Feature Curve 2]项，如图 4-38 所示。

右键点击[Regions] > [Region 1] > [Feature Curves] > [Feature Curve 2] > [Fill All Holes]，如图 4-39 所示。

在弹出的对话框中，选择“Fill Mode”项为“Fill each hole separately”，即单独修复各个漏洞，如图 4-40 所示。

点击“OK”按钮，视图区中车轮上的圆孔全部被填补好，如图 4-41 所示。

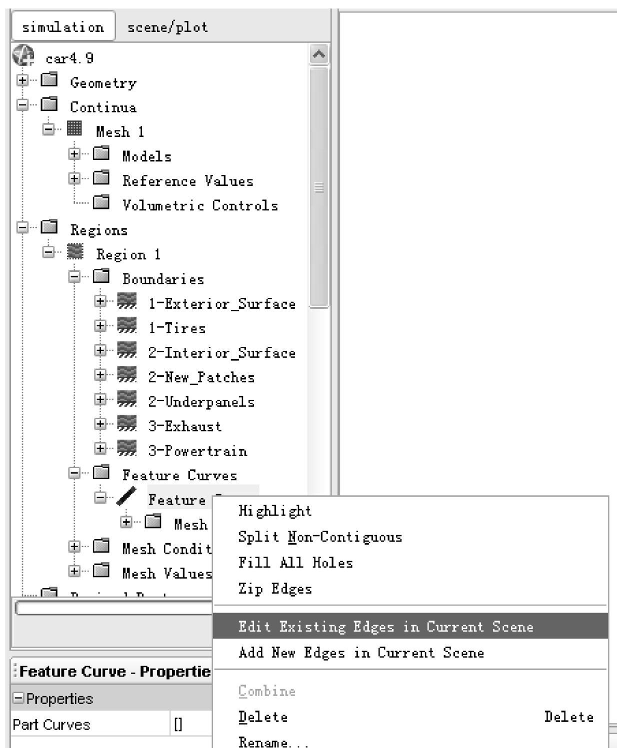


图 4-34　编辑车轮的特征线

4.1.3　包面操作

如图 4-9 所示，再次进行漏洞检查操作。检查结果如图 4-42 所示，“Output”区最后两行显示没有车内与车外的连接路径，即车体外表面封闭，可以进行包面操作。

点击［Regions］＞［Region 1］＞［Mesh Conditions］＞［Volume of Interest Specification］，将其属性栏的“Method”项改为“External”，选择“最大外表面”方式，如图 4-43 所示。

包面完成后，右键点击［Scenes］＞［Geometry Scene 1］＞［ Apply Representation］ ＞［Wrapped Surface］（图 4-44），或右键点击视图区［Apply Representation］＞［Wrapped Surface］（图 4-45），视图区的车体表面 Import 网格变换为 Wrapped 网格。

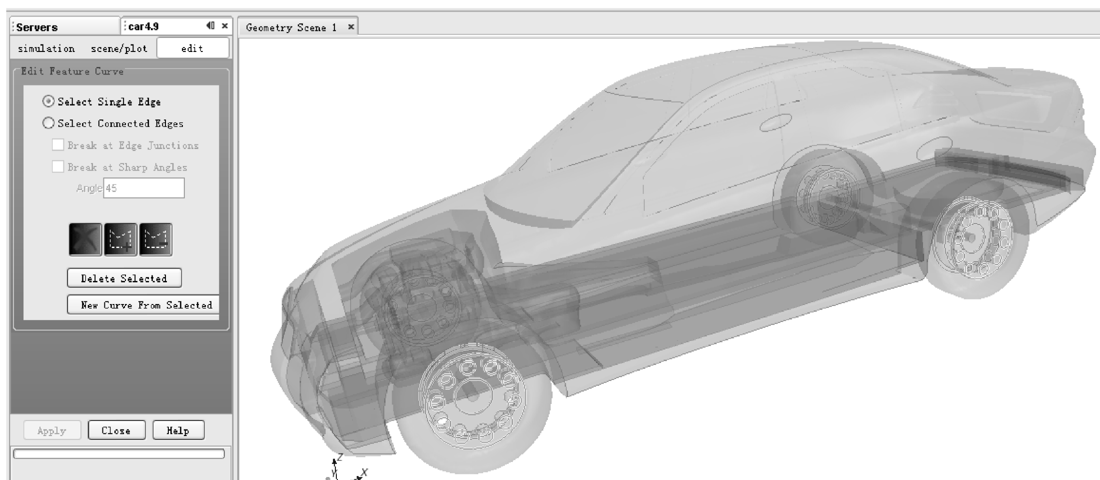


图 4-35　特征线变为黄色线条

包面前的 Import 网格数目为 319853，包面完成后的网格数目为 857354，如图 4-46 所示。

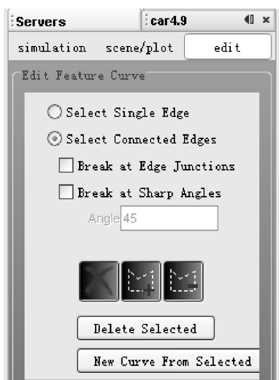


图 4-36　选择“Select Connected Edges”项

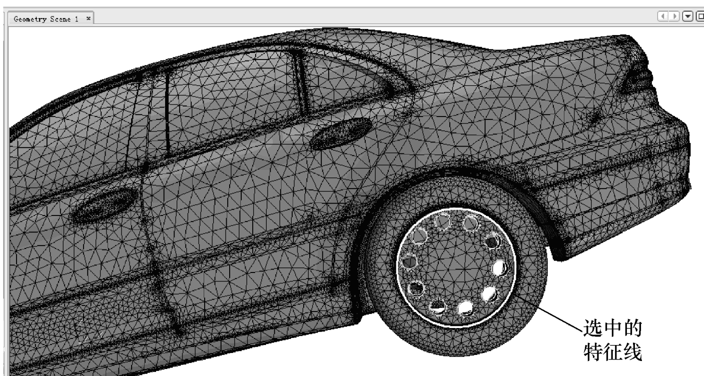


图 4-37　选中的特征线

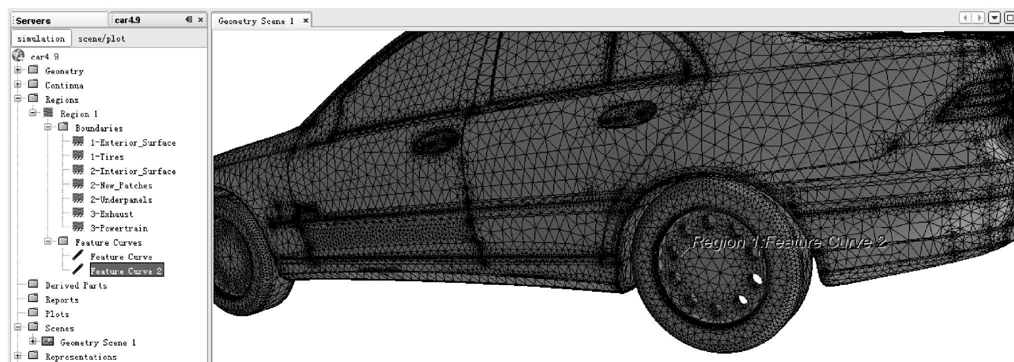


图 4-38　独立显示的 8 条特征线

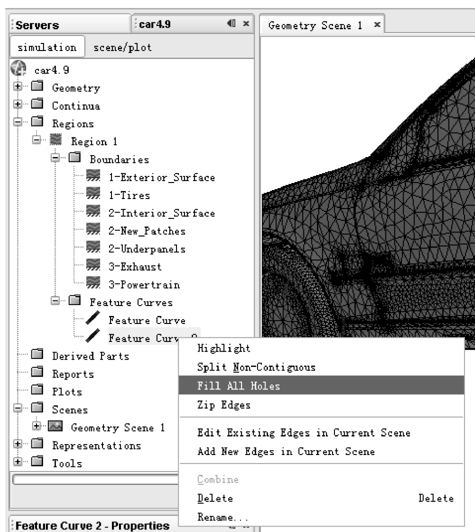


图 4-39　修复漏洞操作



图 4-40　单独修复各个漏洞

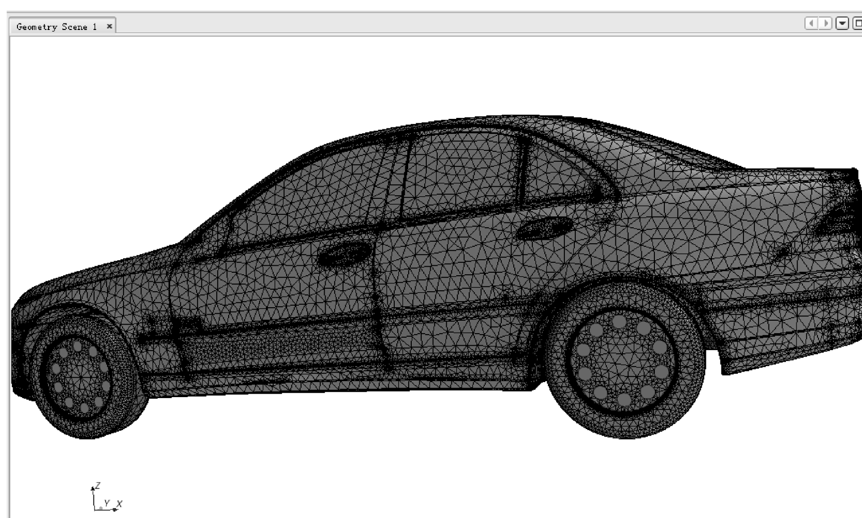


图 4-41　全部修复的车轮上的圆孔

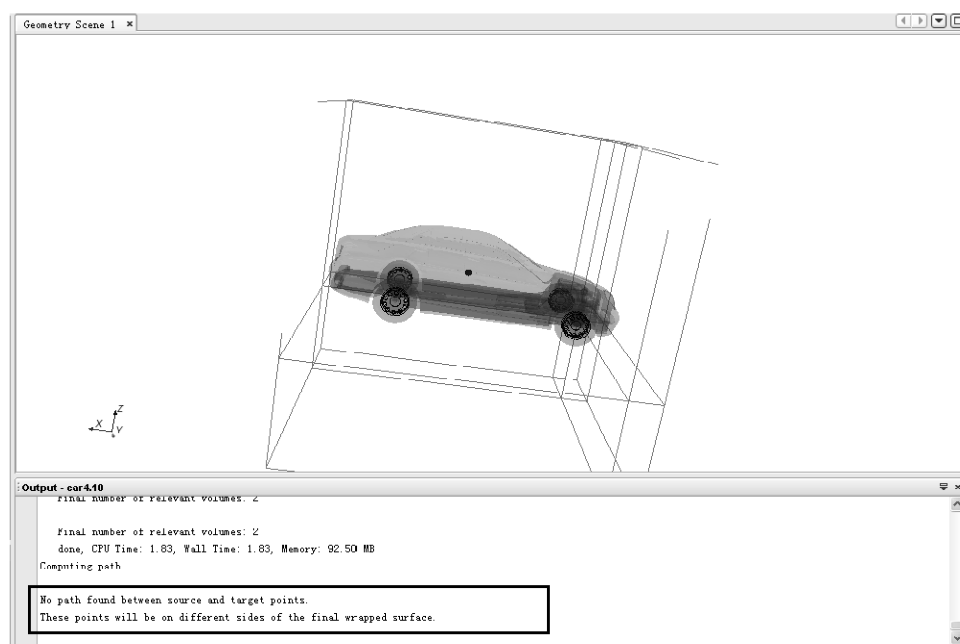


图 4-42　全部修复后车体不存在漏洞

注：因个人电脑和操作习惯，以上数据可能有些出入，差别不大即可。

4.1.4　Remesh 操作

选择“Surface Remesher”工具，重构时可采用较大尺寸，以简化平滑过渡区域车体表面的网格，如图 4-47 所示。

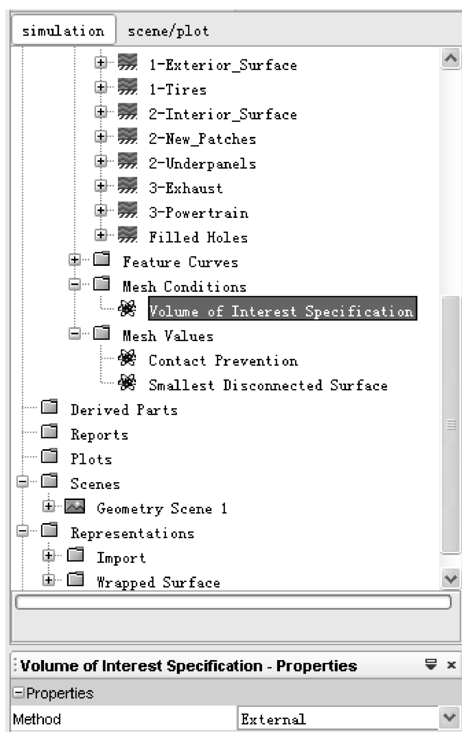


图 4-43　选择"最大外表面"方式

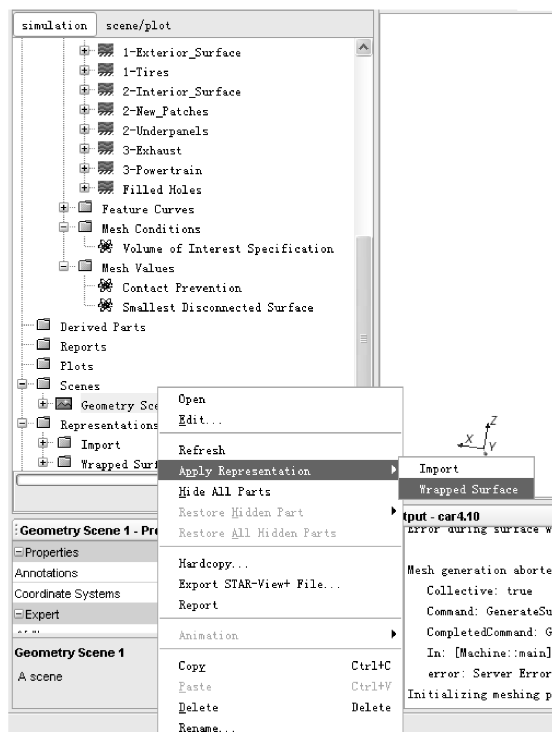


图 4-44　通过树形菜单选择包面网格

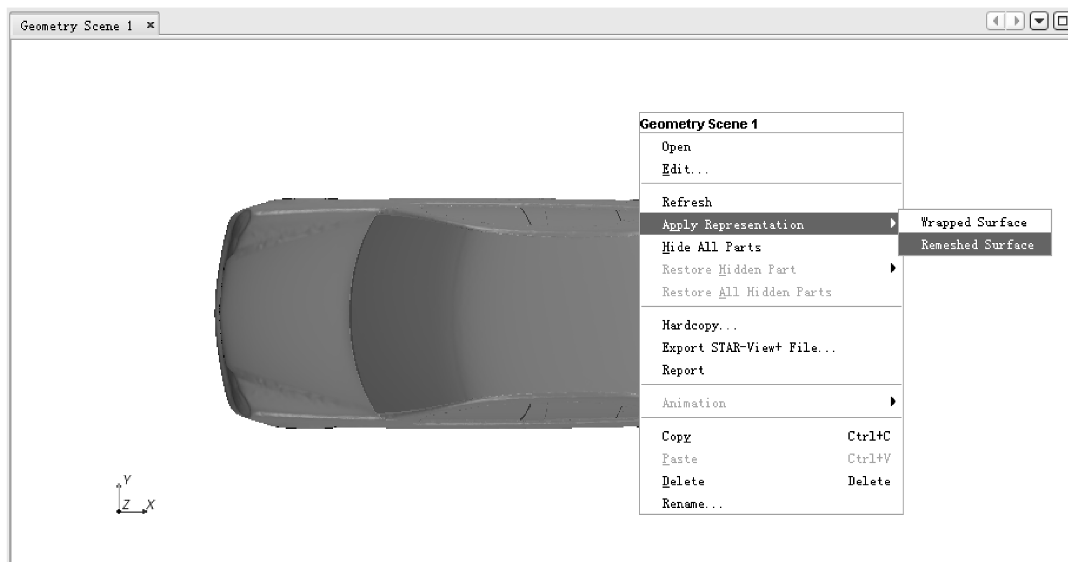


图 4-45　通过视图区选择包面网格

重构网格尺寸采用表 4-1 中的数据。

重构后，网格数目减少为 366580。

面网格的检查标准为：

Face Quality：0. 5

Face Proximity：0. 2

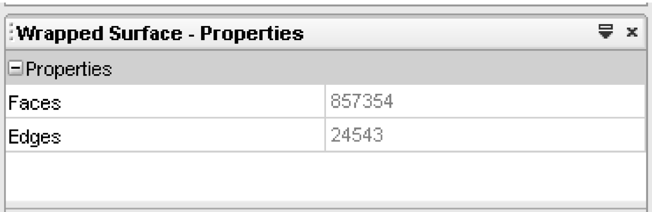


图 4-46　包面网格的数目

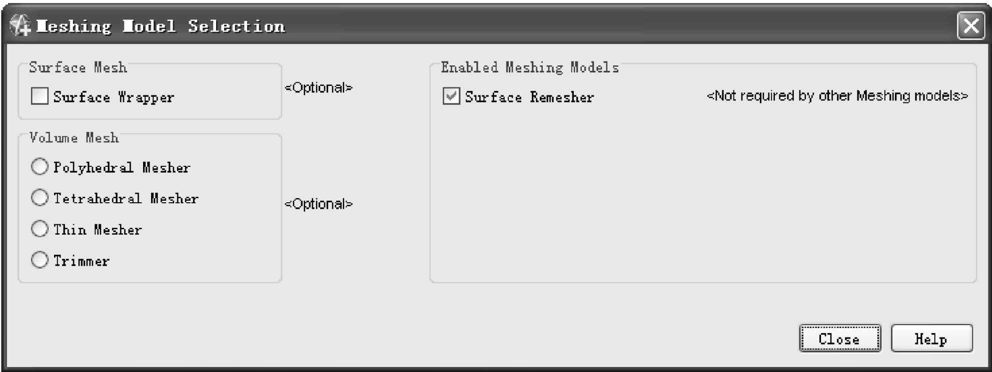


图 4-47　选择重构工具

右键点击[Representation] > [Remeshed Surface] > [Repair Surface]，出现图 4-48 所示的对话框。

点击“OK”按钮，经过检查，出现网格质量检查的各项结果，如图 4-49 左侧所示。由该图可以看出：

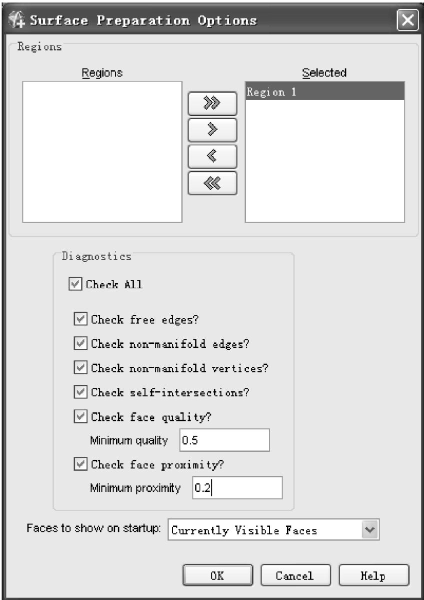


图 4-48　输入网格质量检查值

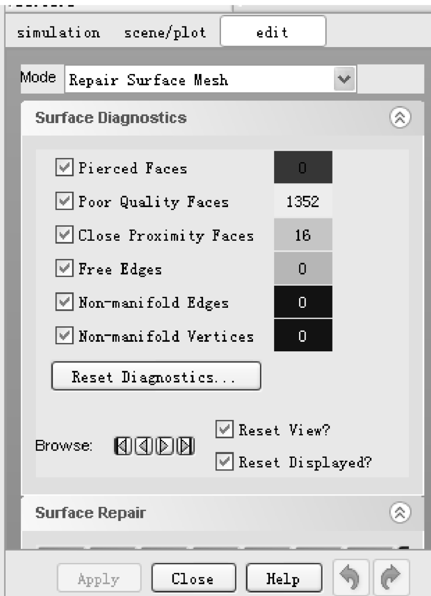


图 4-49　网格质量检查结果

Pierced Faces：0

Face Quality <0.5 的网格数为 1352

Face Proximity <0.2 的网格数为 16

Free Edges：0

Non-manifold Edges：0

Non-manifold Vertices：0

注：由于计算机处理及个人操作习惯等原因，以上所有统计项目的网格数目可能会有一定差异。

4.1.5　生成体网格

1. 体网格设置

选择 “Trimmer” 和 “Prism Layer Mesher” 作为体网格生成工具，如图 4-50 所示。

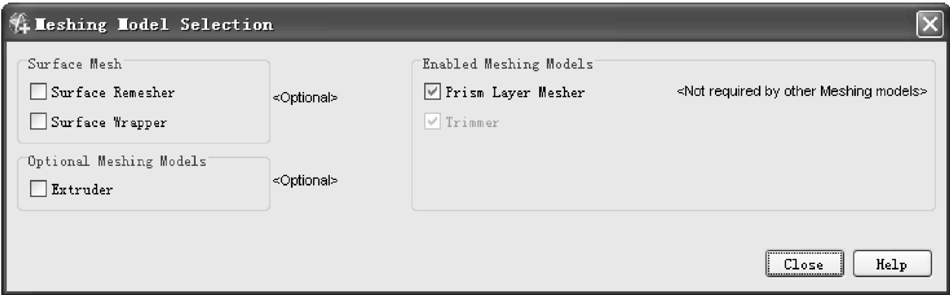


图 4-50　选择 “Trimmer” 和 “Prism Layer Mesher”

体网格尺寸采用表 4-2 中的数据。

由于小汽车表面形状比较复杂，边界层网格采用统一的设置，如表 4-2 所示。

表 4-2　小汽车边界网格尺寸设置

选　　项	选 项 含 义	数　　值
Number of Prism Layers	层数	3
Prism Layer Streching	增长比	1.5
Prism Layer Thickness	总厚度/m	0.04

2. 设置网格加密区

网格加密区需要预先设定加密区域，右键点击 [Tools] > [Volume Shapes] > [New Shape] > [Block]，如图 4-51 所示。

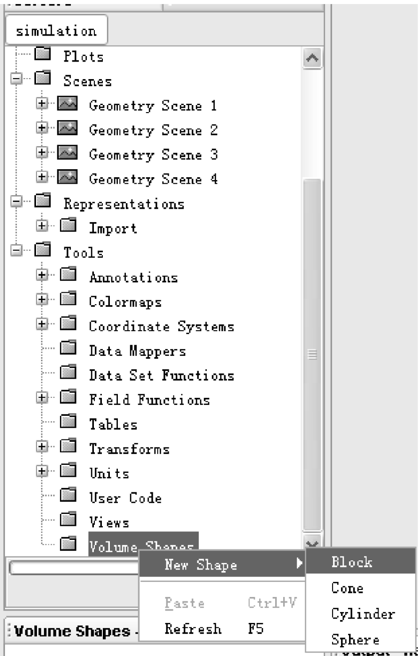


图 4-51　新建加密区

为较为正确地计算车体周围的气流流动特征，应在车体附近布置较多的体网格。本例中，在汽车附近设置三个网格加密区，其中加密区 1 正好包围汽车车体（图 4-52），加密区 2（图 4-53）和加密区 3

(图 4-54)在三个方向的区域位置和加密尺寸均逐级扩大，通过拖拽 6 个方向的控制点即可实现。

各加密区域的加密尺寸如表 4-3 所示。

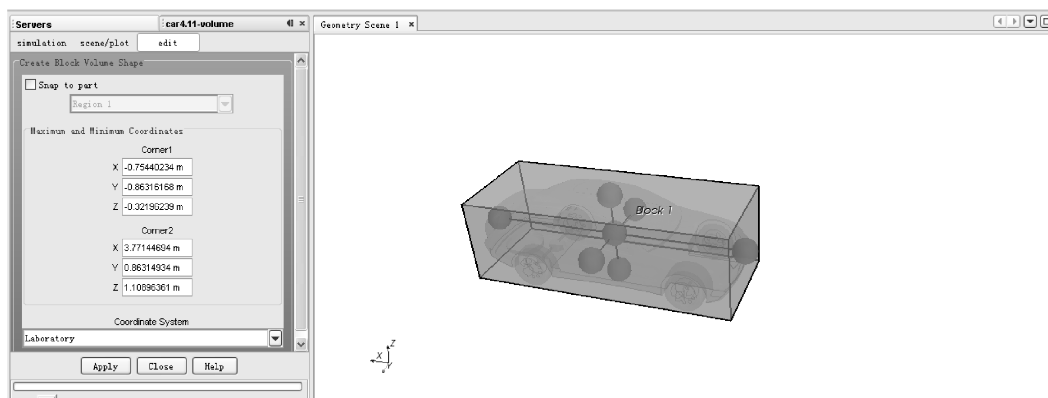


图 4-52　加密区 1(Block 1)

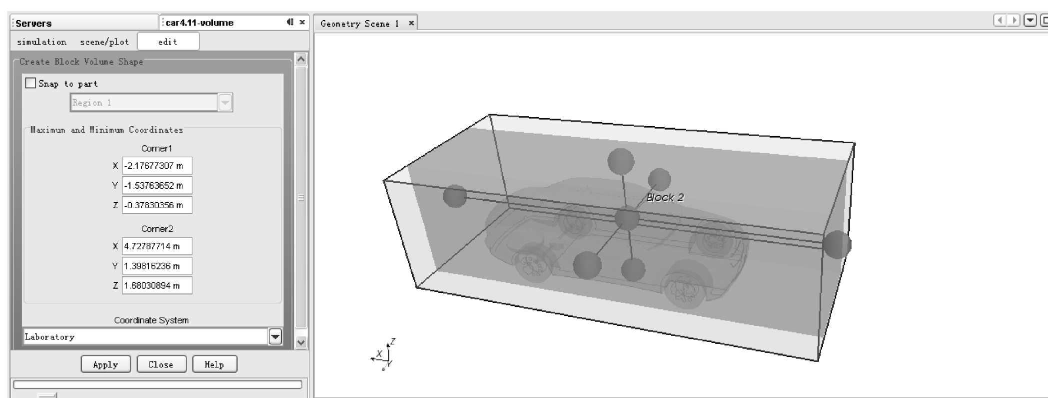


图 4-53　加密区 2(Block 2)

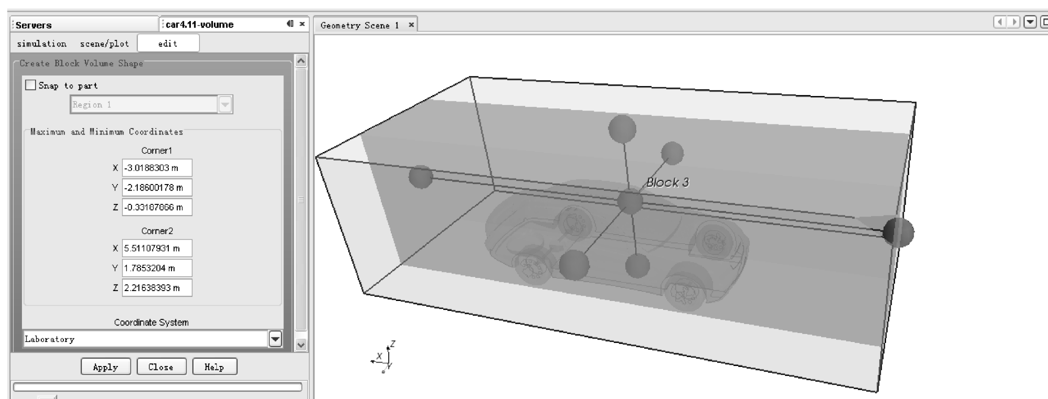


图 4-54　加密区 3(Block 3)

表 4-3　各加密区域的加密尺寸

网格加密控制区	加密区名称	网格尺寸/m
Volumetric Control 1	加密区 1	0.02
Volumetric Control 2	加密区 2	0.04
Volumetric Control 3	加密区 3	0.05

右键点击[Continua]>[Mesh 1]>[Volumetric Controls]>[New]，新建网格加密控制区，如图 4-55 所示。

网格加密区 1 的设置如图 4-56 所示。选择 Volumetric Control 1 属性栏中“Shapes”项最右侧的[...]按钮，在出现的对话框中选择“Block 1”。点击“OK”按钮完成设置，此时 Volumetric Control 1 左侧的灰色图标变为带红绿色的图标。

按同样方法设置其他网格加密区。设置完成后，同时选择三个网格加密控制区，如图 4-57 所示。

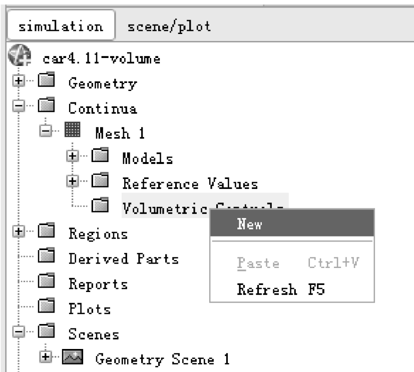


图 4-55　新建网格加密控制区

选择[Continua]>[Mesh 1]>[Volumetric Controls]>[Volumetric Control 1]>[Mesh Conditions]>[Trimmer]，

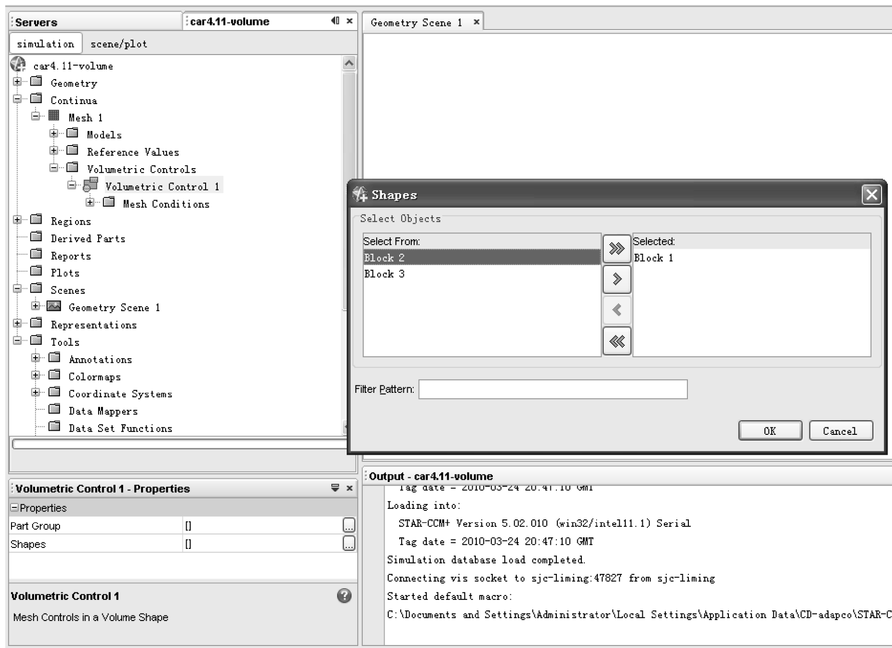


图 4-56　选择网格加密区

再选择其属性栏中的“Customize isotropic size”项，最后选择各向同性加密功能，如图 4-58 所示。可以看到，“Trimmer”项下面出现“Mesh Values”项。

展开[Continua]>[Mesh 1]>[Volumetric Controls]>[Volumetric Control 1]>[Mesh Values]>[Custom Size]>[Relative Size]项，在其属性栏中的“Percentage of Base”项中输入 2.0，即加密体网格尺寸设置为 0.02m，如图 4-59 所示。

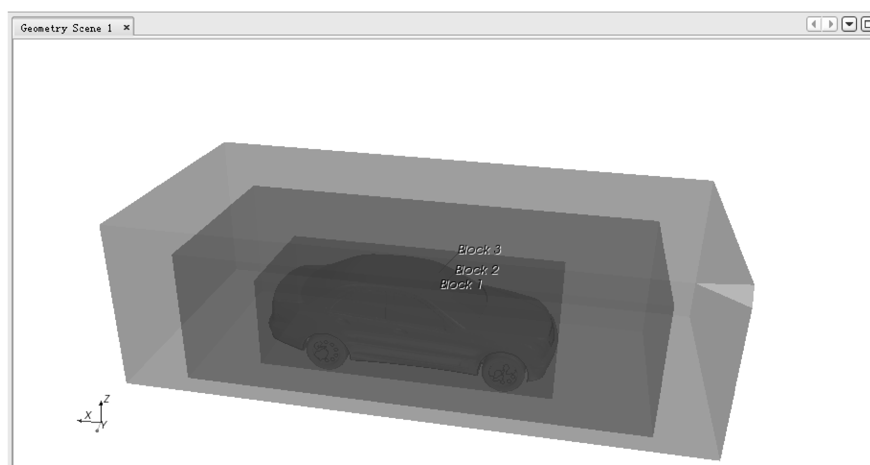


图 4-57　三个网格加密控制区

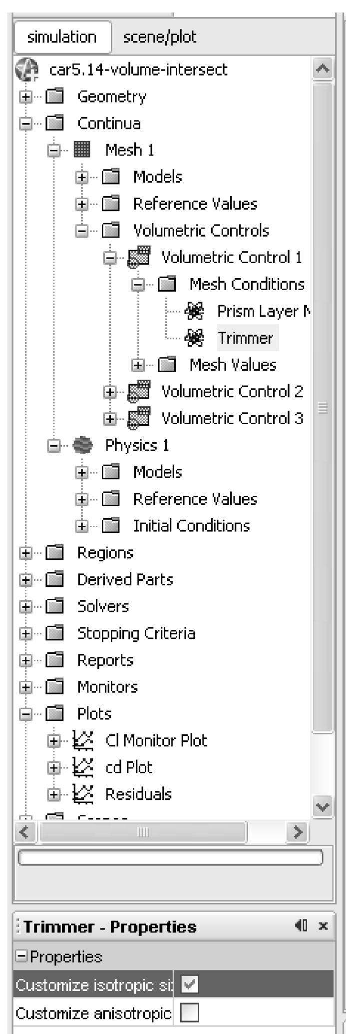


图 4-58　选择加密区 1 的体网格各向同性加密功能

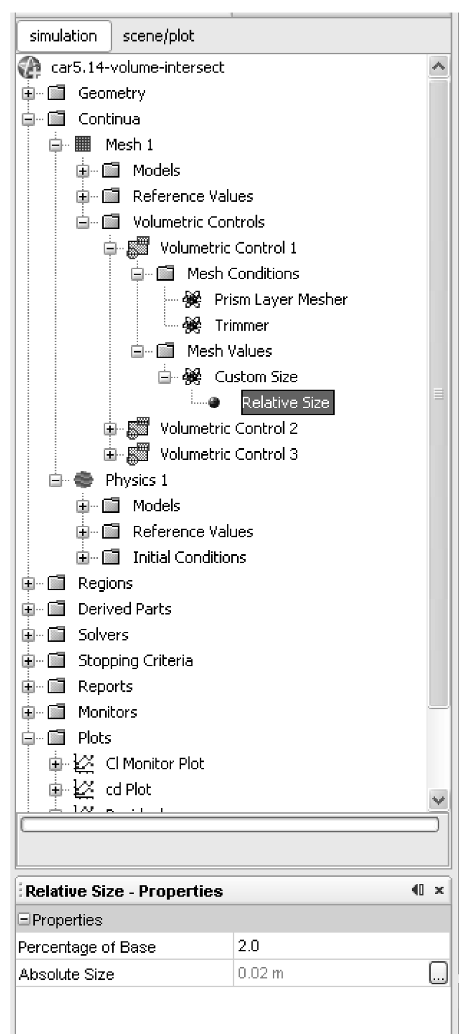


图 4-59　输入加密区 1 的体网格加密尺寸

3. 计算域的添加

针对修复后的 Remesh 网格，添加计算域。右键点击[Representation]>[Remeshed Surface]>[Create Surface]>[Create Block Surface]，如图 4-60 所示。

如果视图区没有打开，会弹出图 4-61 所示的“Create Block Surface”对话框。

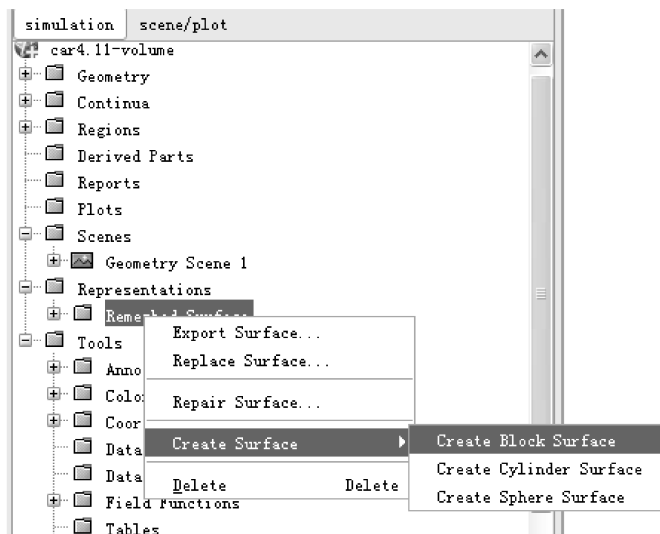


图 4-60　添加计算域

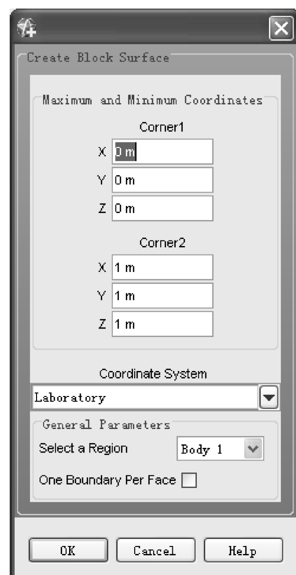


图 4-61　计算域编辑区

也可选择将视图区打开，右键选择[Scenes]>[New Scene]>[Geometry]，生成新的几何视图，再右键点击[Representation]>[Remeshed Surface]>[Create Surface]>[Create Block Surface]，打开的计算域编辑区如图 4-62 所示。这种做法有计算域编辑区可视化的优点，方便用户及时检查计算域设置的准确性。

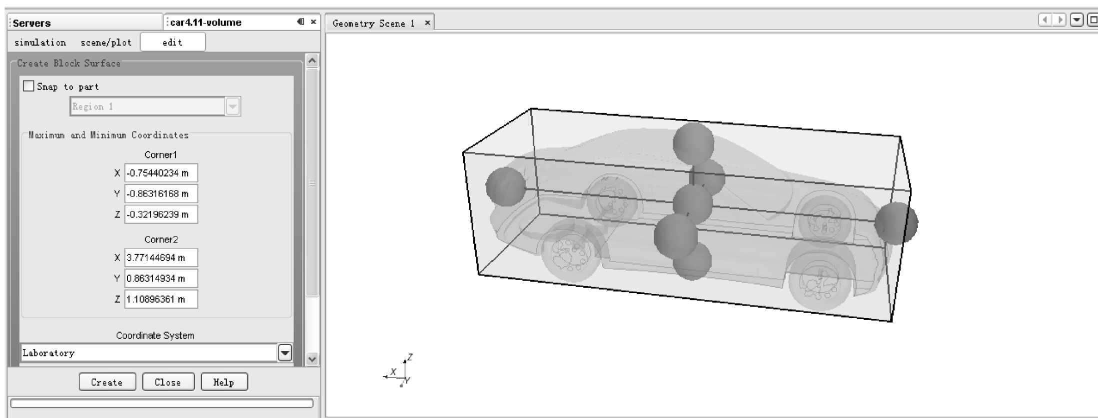


图 4-62　可视化计算域编辑区

为方便后文在小汽车前端地面处设置无滑移边界条件，本例中设置两个 block。依次生成车体前端 block 和车体 block，其位置设置分别如图 4-63 和图 4-64 左侧的数据栏所示。在图 4-63 中，车体前端 block 有时候会显示不全，这是计算机显示方面能力不够的原因，实际

在图 4-64 中，这个 block 是成功建立了的。

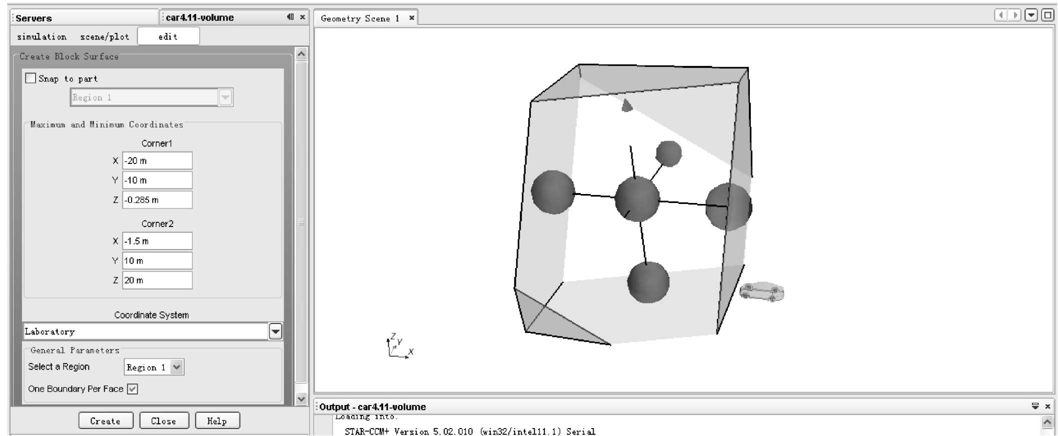


图 4-63　车体前端 block 位置设置

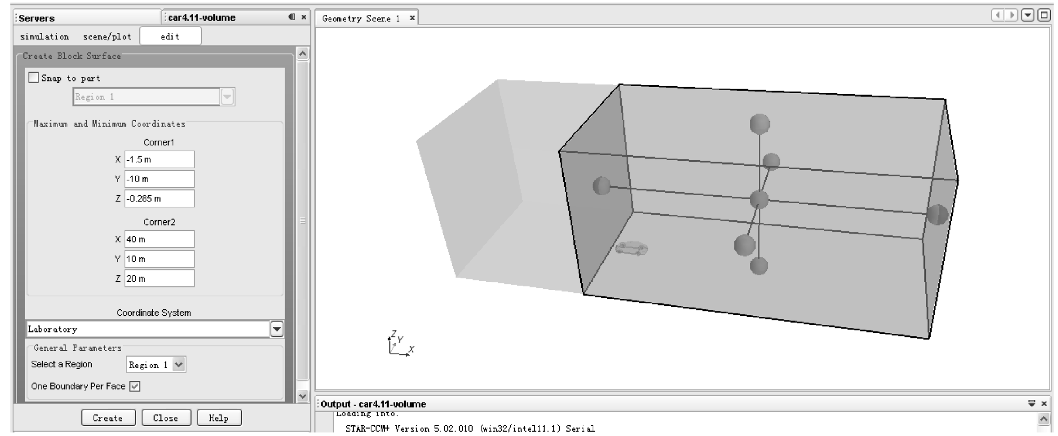


图 4-64　车体 block 位置设置

为方便对计算域各个面进行编辑，选择图 4-63 和图 4-64 左侧对话框中的“One Boundary Per Face”项，则所生成的两个计算域可分别分为六个面单独编辑。

点击“Close”按钮，完成计算域创建。在树形菜单中选择[Regions]>[Region 1]>[Boundaries]下的“Block Faces 6”和“Block Faces 7”两项，可知这两个面为两个计算域重叠的面，应删除，如图 4-65 所示。

如图 4-66 所示，删除这两个面。

右键点击[Representation]>[Remeshed Surface]>[Repair Surface…]，如图 4-67 所示，在“Diagnostics Options”对话框中仅保留“Check free edges”一项，检查网格中存在的自由边。

自由边的检查结果如图 4-68 所示。可以看到，删除的重叠面之间存在 8 条自由边。双击 Free Edges 8 中带有“8”字的绿色方框，选中这 8 条自由边。

点击“Surface Repair”栏中的工具，将这些自由边合并。操作完成后，左侧

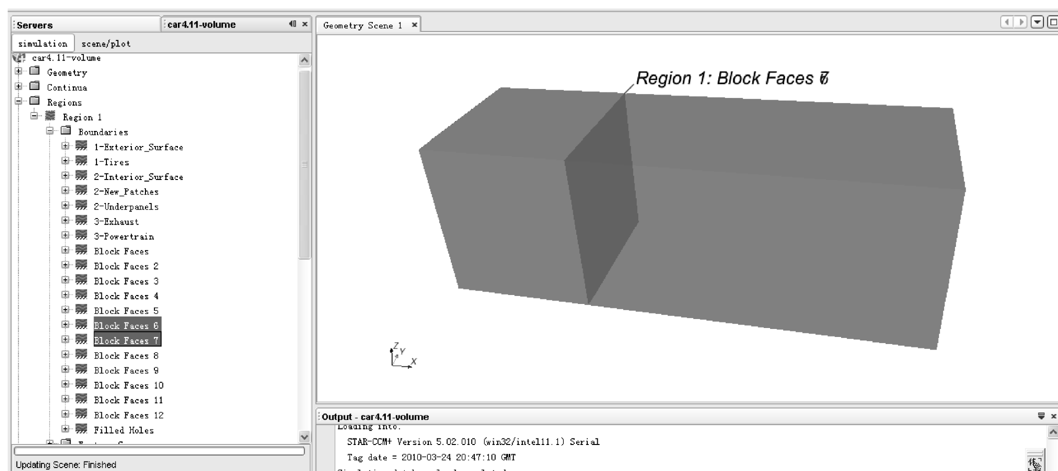


图 4-65　选择两个计算域重叠的面

Free Edges 8 中带有“8”字的绿色方框，数字自动变为“0”，表明自由边合并成功，如图 4-69 所示。

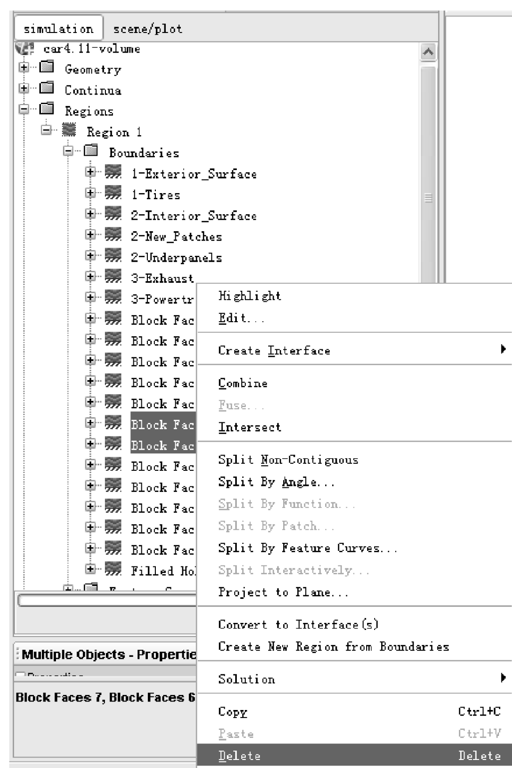


图 4-66　删除两个计算域重叠的面

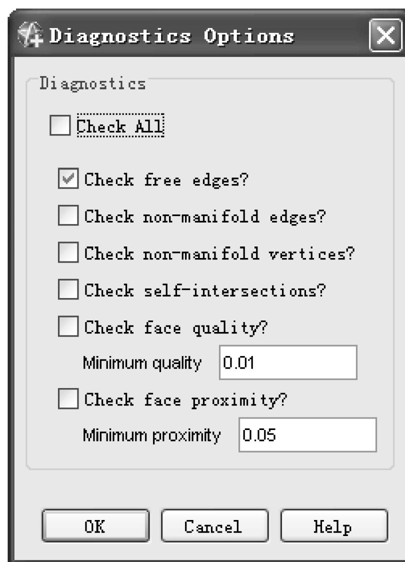


图 4-67　检查自由边

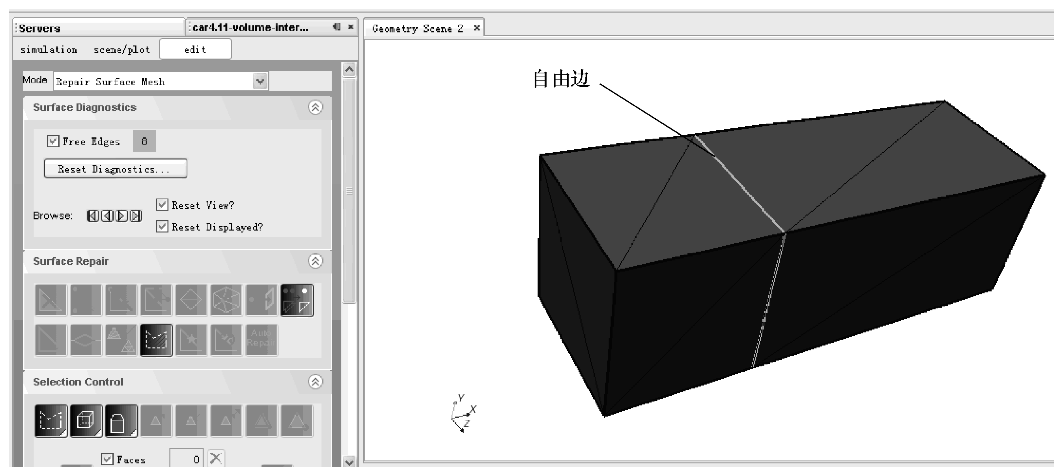


图 4-68　重叠面之间的自由边

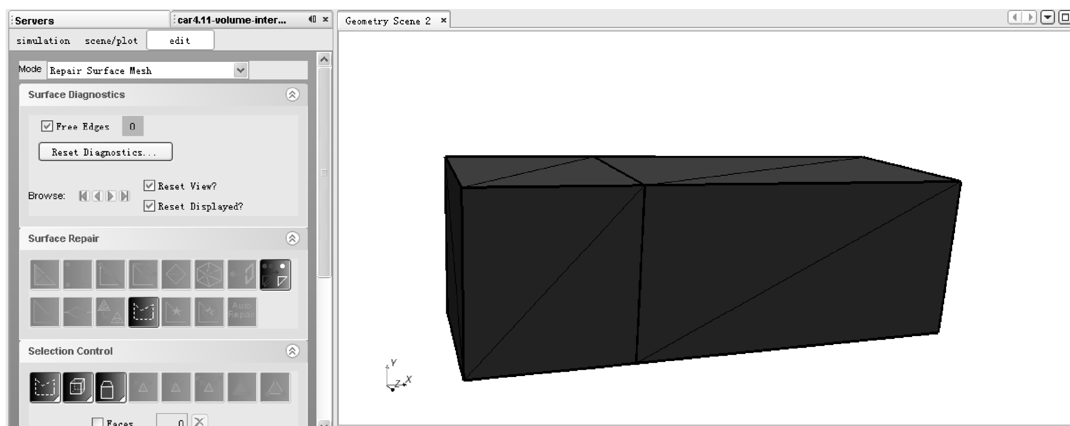


图 4-69　自由边合并成功

4. 地面与车轮的处理

由于小汽车行驶时车轮与地面紧密接触，故计算域中的地面应与车轮进行相交处理，删除多余的部分。

这需要先生成地面和车轮的交线，再删除不需要的面。如图 4-70 所示，选择“1-Tires”和“Block Faces 9”这两个 boundary，右键点击“Intersect”选项即完成相交操作。

右键选择[Regions] > [Region 1] > [Boundaries] > [1-Tires] > [Show Only This Part]，单独显示车轮，如图 4-71 所示。

右键选择[Regions] > [Region 1] > [Boundaries] > [1-Tires] > [Split Interactively…]，进行车轮的分割操作，如图 4-72 所示。

如图 4-73 所示，按住“Ctrl”键，在视图区中选择分割区，其中四个车轮共四个分割区。在左侧“Boundary Name”项输入“Tires-intersect”作为被分割出来的区域的名称，点击“Create”按钮完成车轮分割区的创建。

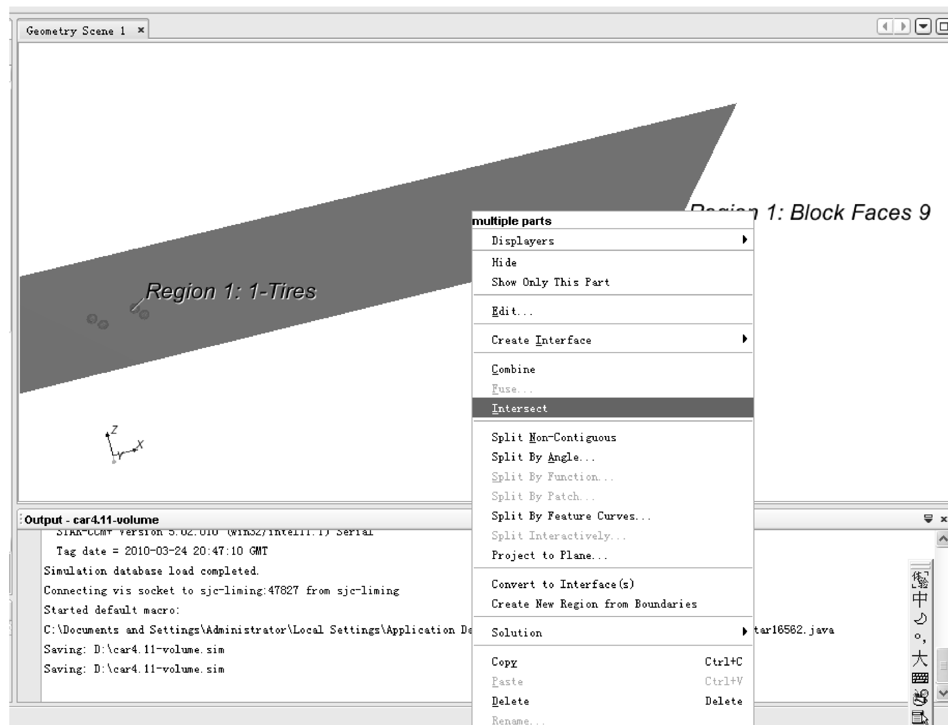


图 4-70　地面与车轮相交处理

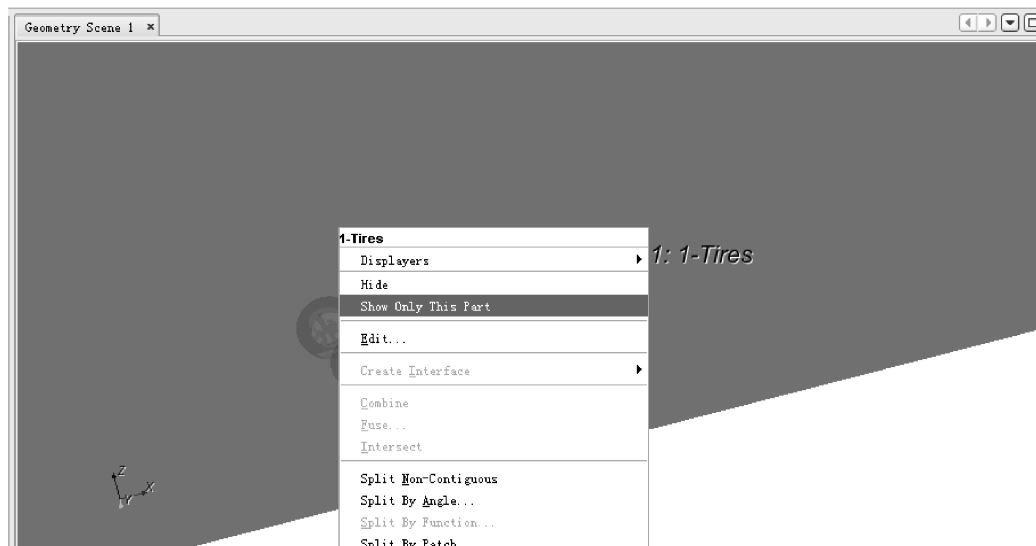


图 4-71　单独显示车轮

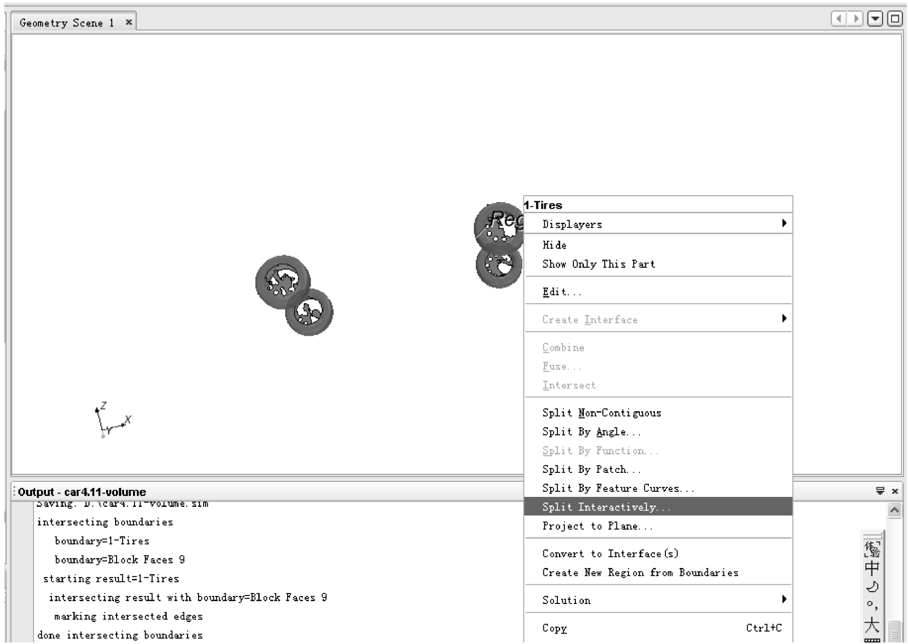


图 4-72　boundary 分割

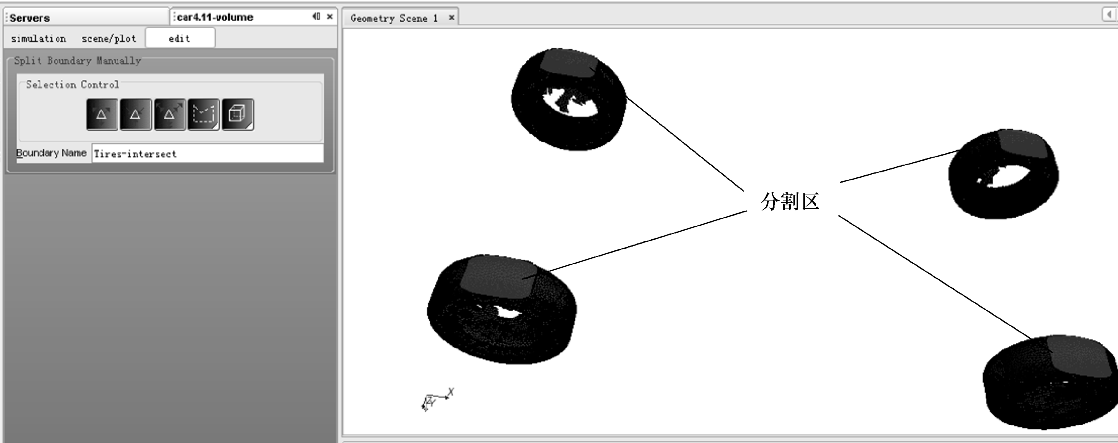


图 4-73　选择分割区

点击“Close”按钮回到视图区，如图 4-74 所示，在树形菜单中选择[Regions]>[Region 1]>[Boundaries]>[Tires-intersect]>[Delete]，删除车轮上的分割区。

右键选择车体底部地面边界[Regions]>[Region 1]>[Boundaries]>[Block Faces 9]>[Split Interactively…]，进行地面边界分割操作，如图 4-75 所示。

如图 4-76 所示，按住“Ctrl”键，在视图区中选择分割区，共四个分割区。在左侧“Boundary Name”项输入“Block Faces 9-inersect”作为被分割出来的区域的名称，点击“Create”按钮完成地面分割区的创建。

在树形菜单中右键选择[Regions]>[Region 1]>[Boundaries]>[Block Faces 9-inersect]>

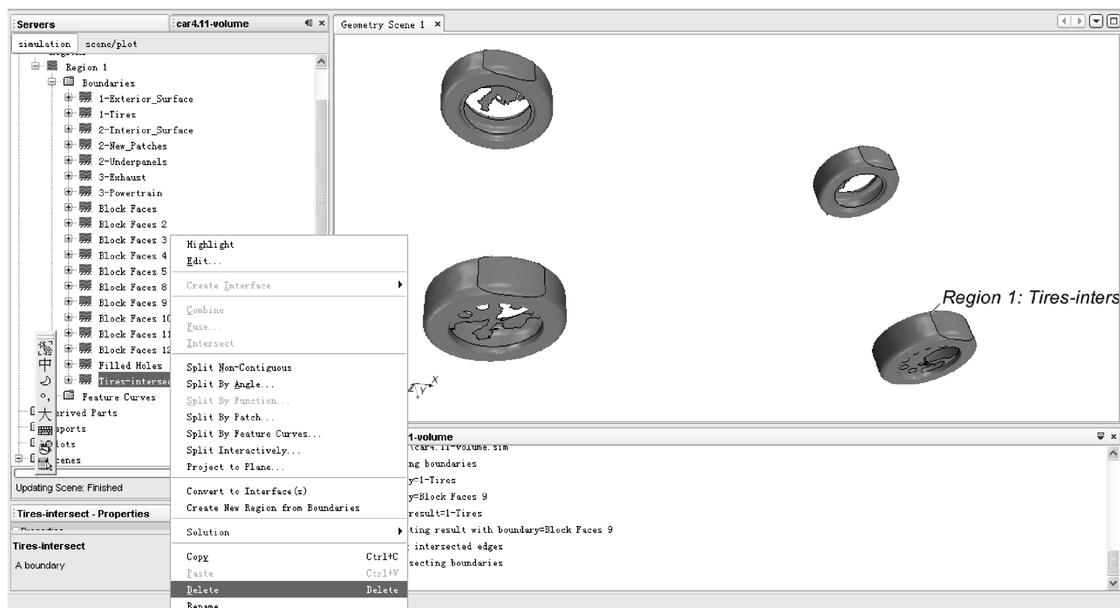


图 4-74　删除车轮上的分割区

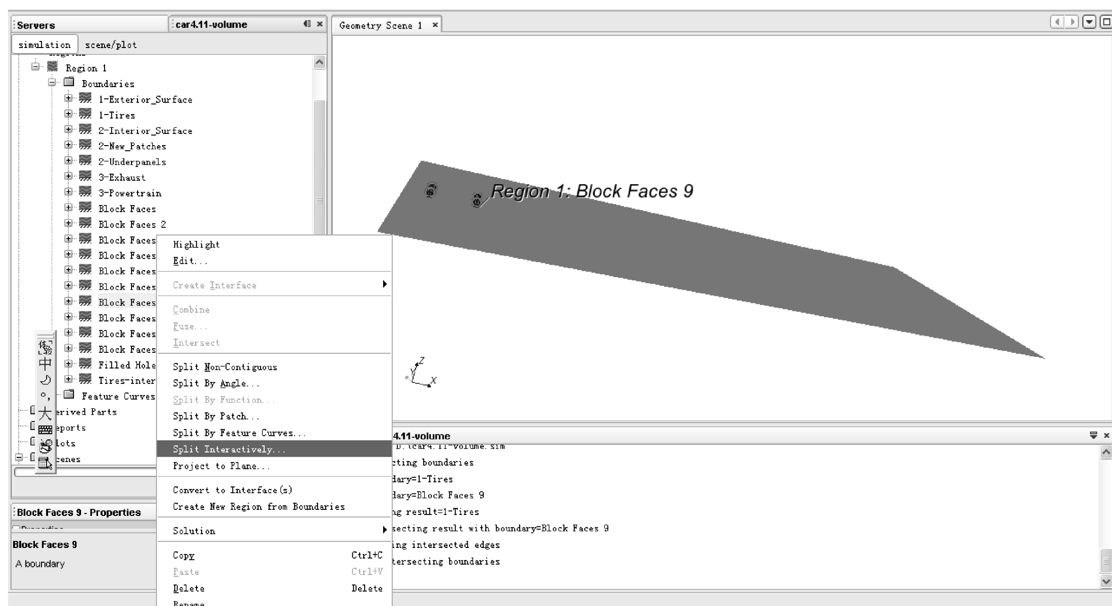


图 4-75　地面边界分割

[Delete]，删除地面分割区，如图 4-77 所示。

5. 体网格的生成和检查

在划分体网格前，选择[Continua] > [Mesh 1] > [Models] > [Trimmer]项属性栏中的“Run Optimizer”项，进行体网格划分完成后进行网格质量的优化操作，如图 4-78 所示。

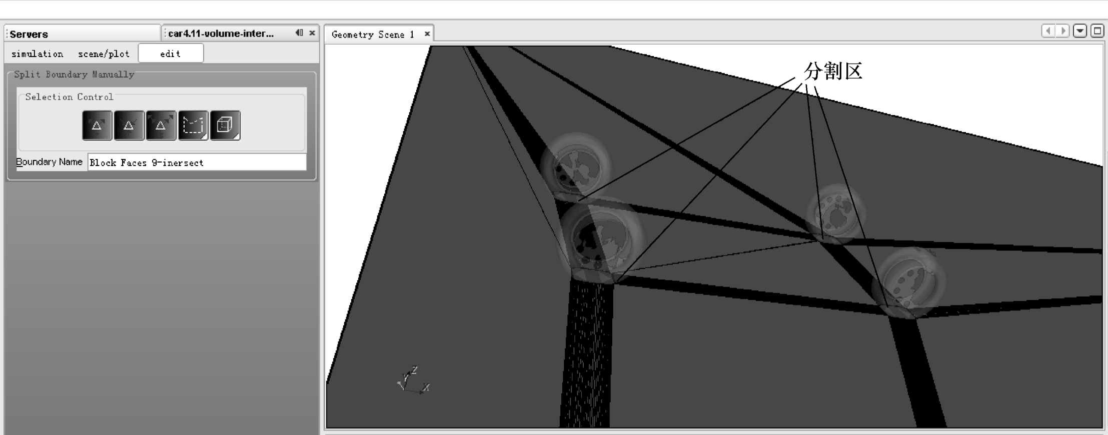


图 4-76 创建地面分割区

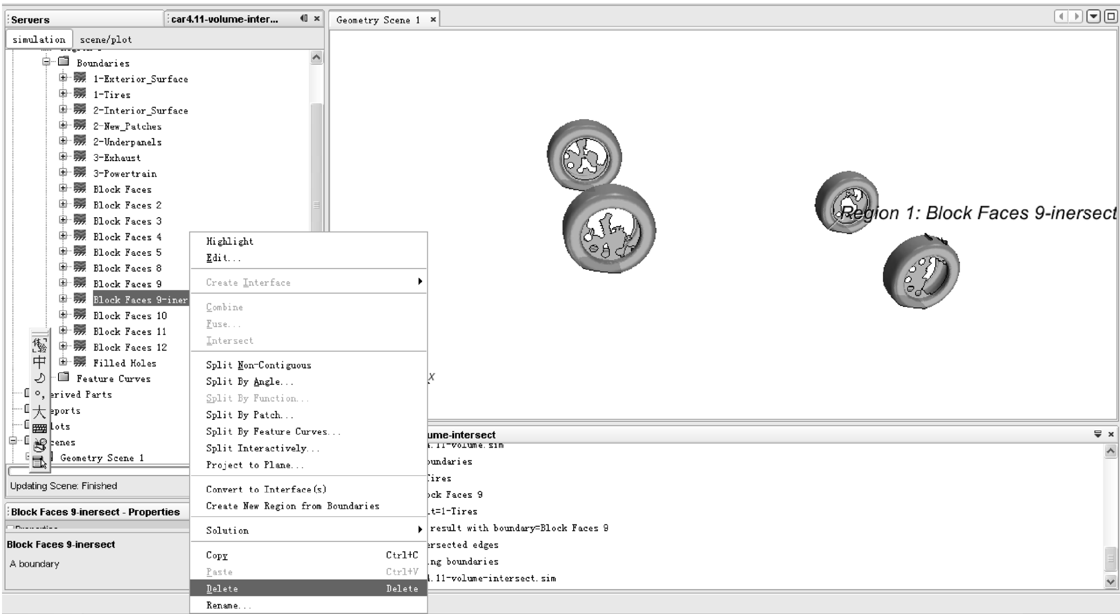


图 4-77 删除地面分割区

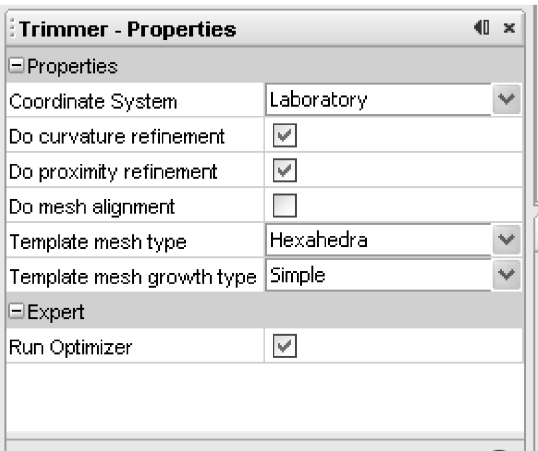


图 4-78 选择“Run Optimizer”项

删除包面和操作产生的特征线，如图 4-79 所示。这样可以取消特征线对体网格划分的限制，也就保证了体网格质量。

由于采用了边界层网格工具，软件会默认在各面上均划分边界层。计算域的进口、出口、顶面、汽车前端地面和两个侧面这六个面只是虚拟的计算域表面，无需划分边界层，而底部地面则应划分边界层。故本例中取消 inlet、outlet、slip-ground、top、side-1 和 side-2 六个面上的边界层网格。其中，slip-ground 采用滑移边界条件是为了去除小汽车前方地面的边界层效应。

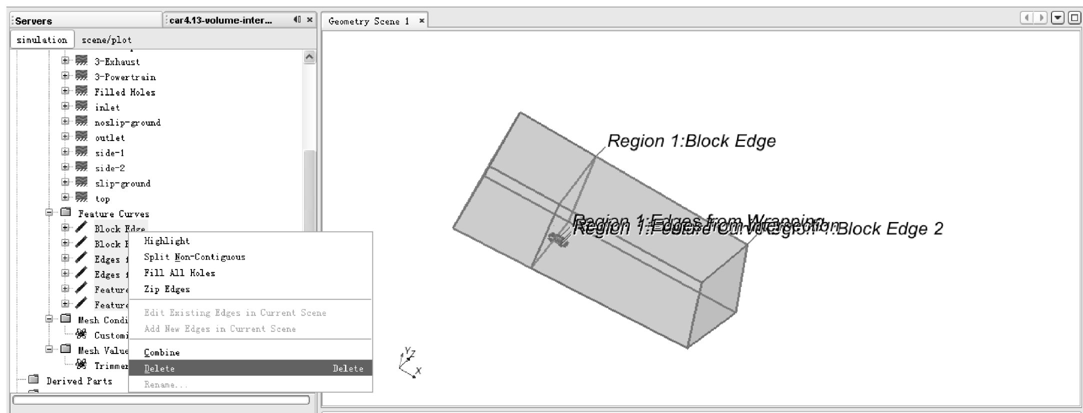


图 4-79　删除特征线

如图 4-80 所示，选择［Regions］>［Region 1］>［Boundaries］>［slip-ground］>［Mesh Conditions］>［Customize Prism Mesh］，将其属性栏中的“Customize Prism Mesh”项修改为“Disable”，即在该面上不划分边界层网格。

右键选择 slip-ground 边界，执行“Copy”命令，复制 slip-ground 边界的网格设置，如图 4-81 所示。右键选择 inlet 边界，执行“Paste”命令，粘贴 slip-ground 边界的网格设置，如图 4-82 所示。重复以上操作，完成其他滑移表面的设置。

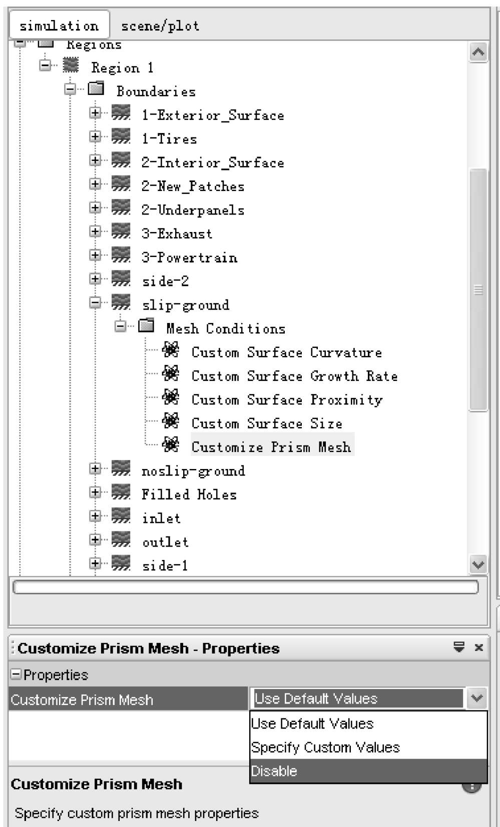


图 4-80　取消边界层网格划分

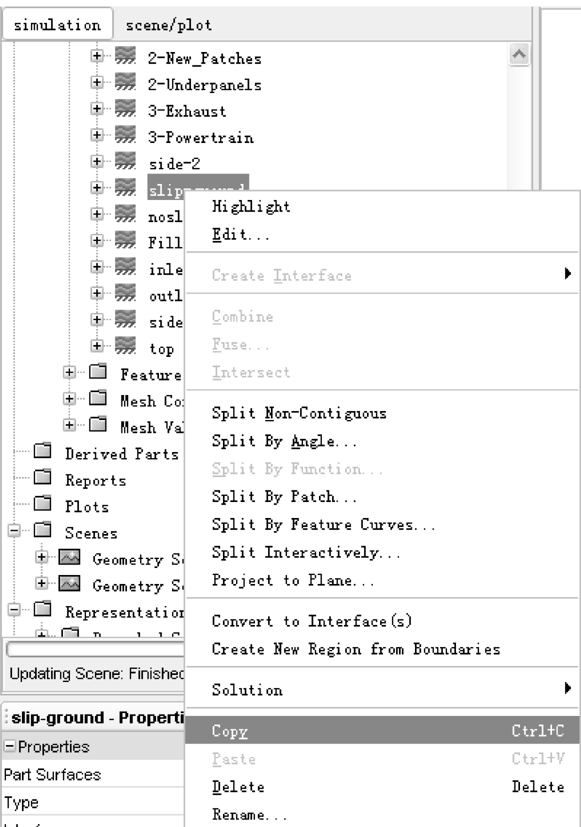


图 4-81　复制 slip-ground 边界的网格设置

生成体网格前，需要先删除掉 Representations 节点下的 Wrapped Surface 网格子节点，只保留 Remeshed Surface 网格。这是因为体网格划分只能针对一套面网格进行。

如图 4-83 所示，选择[Derived Parts]>[New Part] >[Section]>[Plane...]，生成截面，用于显示截面网格。

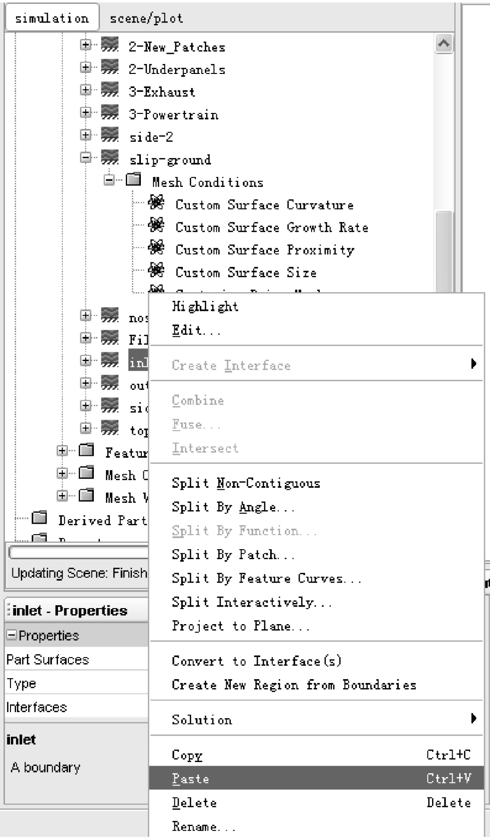


图 4-82　复制 slip-ground 边界的网格设置

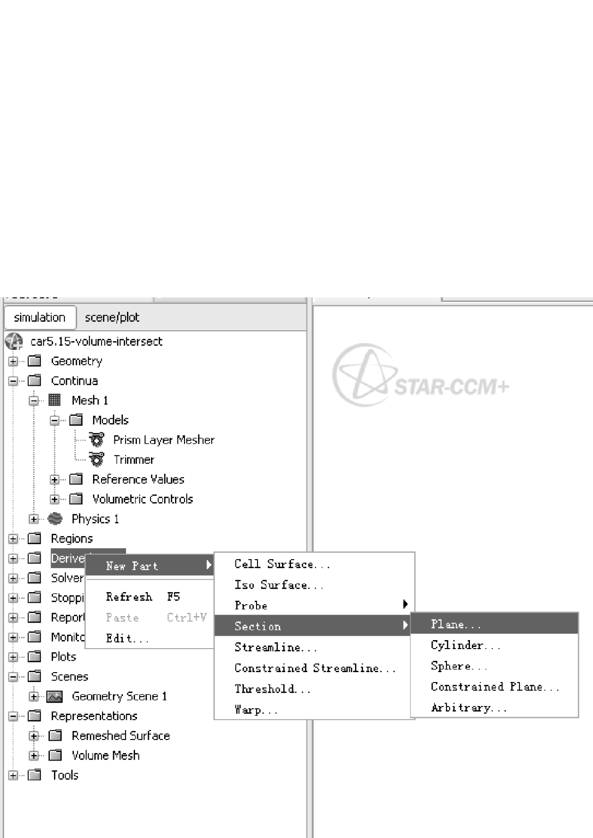


图 4-83　生成截面

按图 4-84 所示设定截面位置数据。

新建 Mesh 视图，如图 4-85 所示。

双击[Scenes]>[Mesh Scenes 1] >[Displayers]>[Mesh 1]>[Parts]，选择新建立的平面截面，如图 4-86 所示。

打开 Mesh 视图，如图 4-87 所示。小汽车附近的网格如图 4-88 所示。

点击菜单项[Mesh]>[Diagnostic]，检查体网格质量，如图 4-89 所示。输出栏中的检查结果显示如下：

```
--- Computing statistics in Region: Region 1
--------------------------------------------------
-> ENTITY COUNT:
    # Cells: 6710385
    # Faces: 20035065
    # Verts: 7457047
```

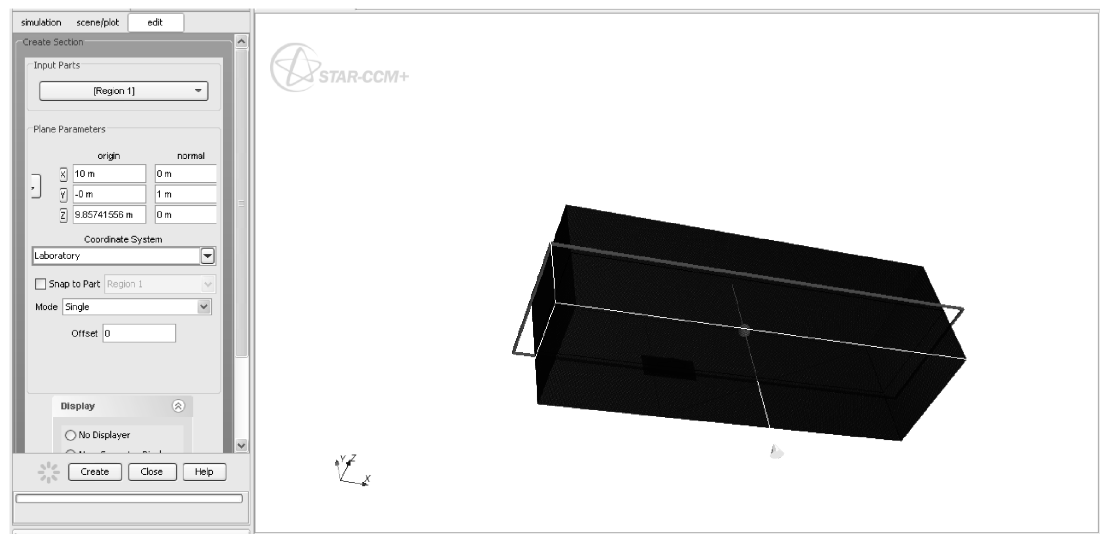


图 4-84　设定截面位置数据

-> EXTENTS:

x: [-2.0000e+001, 4.0000e+001] m

y: [-1.0000e+001, 1.0000e+001] m

z: [-2.8517e-001, 2.0000e+001] m

-> MESH VALIDITY:

Mesh is topologically valid and has no negative volume cells.

-> FACE VALIDITY STATISTICS:

Minimum Face Validity: 9.999989e-001

Maximum Face Validity: 1.000000e+000

Face Validity <	0.50	0	0.000%
0.50 <= Face Validity <	0.60	0	0.000%
0.60 <= Face Validity <	0.70	0	0.000%
0.70 <= Face Validity <	0.80	0	0.000%
0.80 <= Face Validity <	0.90	0	0.000%
0.90 <= Face Validity <	0.95	0	0.000%
0.95 <= Face Validity <	1.00	1	0.000%
1.00 <= Face Validity		6710384	100.000%

-> VOLUME CHANGE STATISTICS:

Minimum Volume Change: 1.129293e-005

Maximum Volume Change: 1.000000e+000

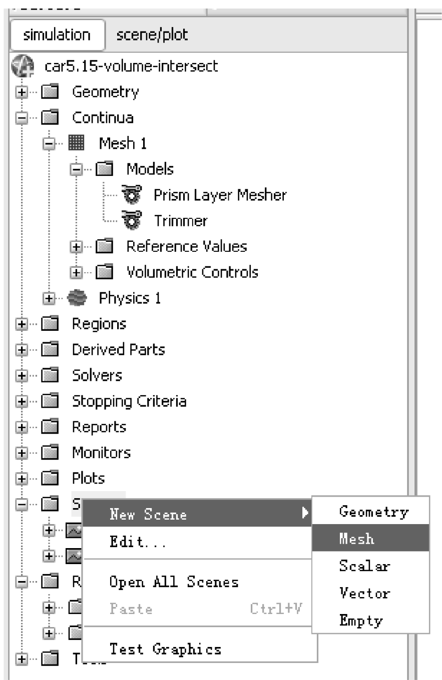


图 4-85　新建 Mesh 视图

Volume Change <	0.000000e+000	0	0.000%
0.000000e+000 <= Volume Change <	1.000000e-006	0	0.000%
1.000000e-006 <= Volume Change <	1.000000e-005	0	0.000%
1.000000e-005 <= Volume Change <	1.000000e-004	5	0.000%
1.000000e-004 <= Volume Change <	1.000000e-003	96	0.001%
1.000000e-003 <= Volume Change <	1.000000e-002	1286	0.019%

1. 000000e-002 < = Volume Change < 1. 000000e-001 50313 0. 750%
1. 000000e-001 < = Volume Change < = 1. 000000e + 000 6658685 99. 230%

可以看出，体网格质量较好。

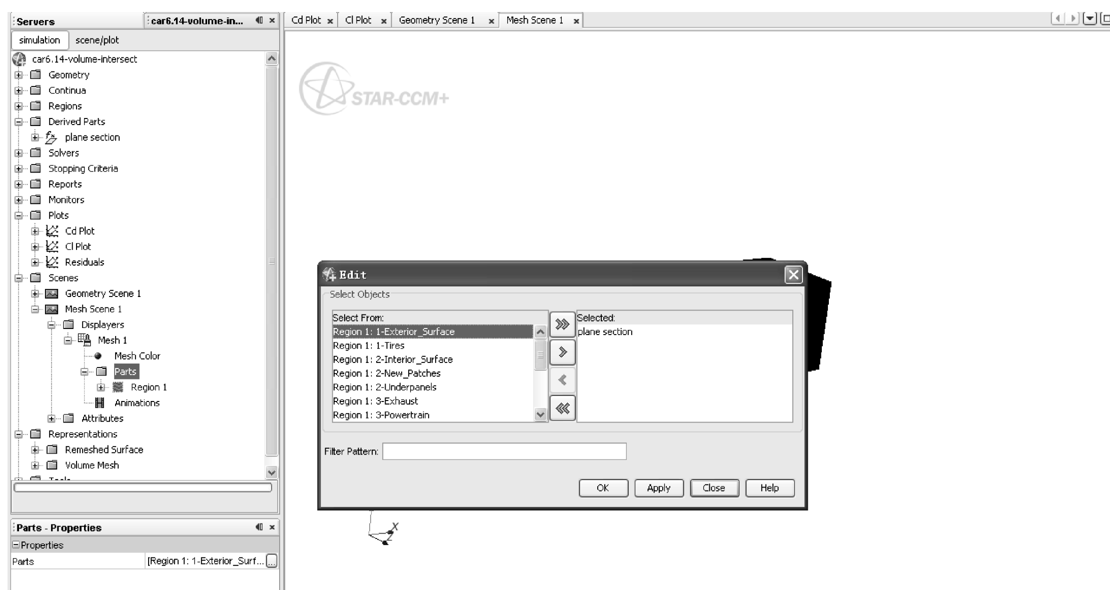


图 4-86　选择新建立的平面截面

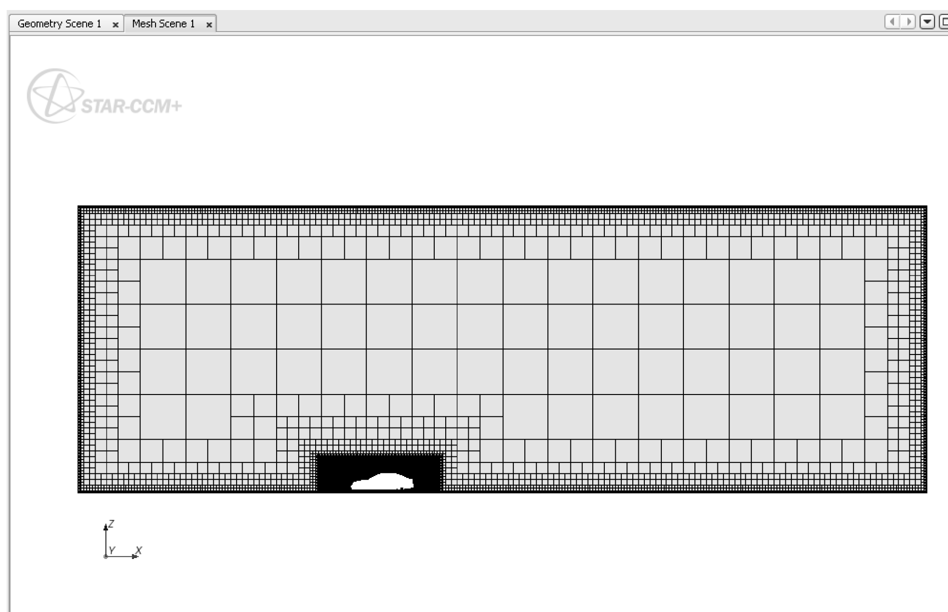


图 4-87　打开 Mesh 视图

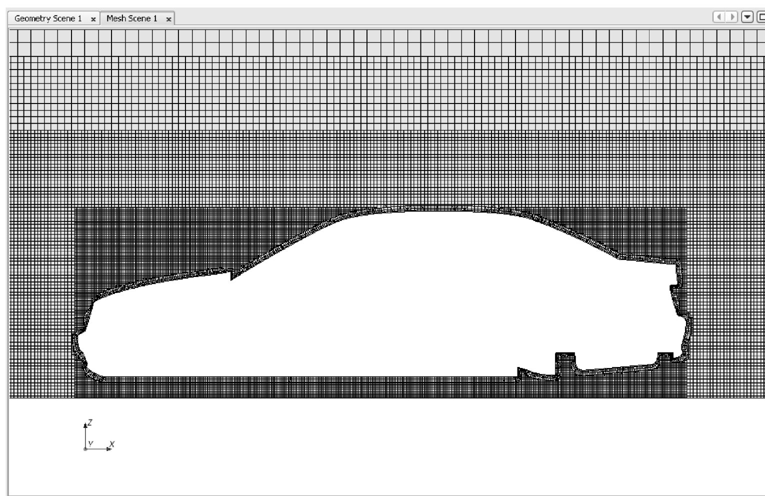


图4-88　小汽车附近的网格

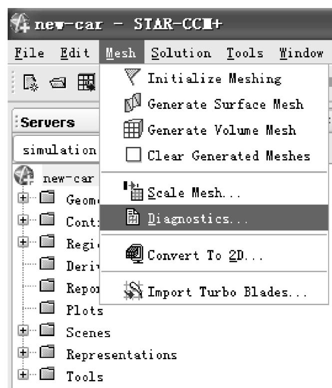


图4-89　检查体网格质量

4.2　求解

4.2.1　边界条件设置

1. 入口边界条件

入口处采用速度入口边界条件，如图4-90所示。选择[Regions]>[Region1]>[Boundaries]>[inlet]属性栏“Type”项中的“Velocity Inlet”项，如图4-91所示。输入入口速度，在[Regions]>[Region1]>[Boundaries]>[inlet]>[Physics Values]>[Velocity Magnitude]>[Constant]属性栏“Value”项中输入30m/s。

2. 出口边界条件

出口处采用速度压力出口边界条件，如图4-92所示。选择[Regions]>[Region 1]>[Boundaries]>[outlet]属性栏“Type”项中的“Pressure outlet”项，如图4-93所示。保持[Regions]>[Region1]>[Boundaries]>[outlet]的“Physics Conditions”和“Physics Values”的设置不变，出口压力设定为大气压力，即相对压力[Regions]>[Region1]>[Boundaries]>[outlet]>[Physics Values]>[Pressure]>[Constant]设置为0。

3. 汽车表面边界条件

如图4-94所示，选择[Regions]>[Region 1]>[Boundaries]>[1-Exterior_Surface]，将其属性栏中“Type”项设置为“Wall”条件。

如图4-95所示，选择[Regions]>[Region 1]>[Boundaries]>[1-Exterior_Surface]>[Physics Conditions]>[Shear Stress Specification]属性栏“Method”项中的“No-Slip”项，将汽车表面设定为无滑移边界条件，以模拟汽车表面的摩擦力。然后通过复制和粘贴“1-Exterior_Surface”的设定，完成其他汽车表面边界壁面条件的设定。

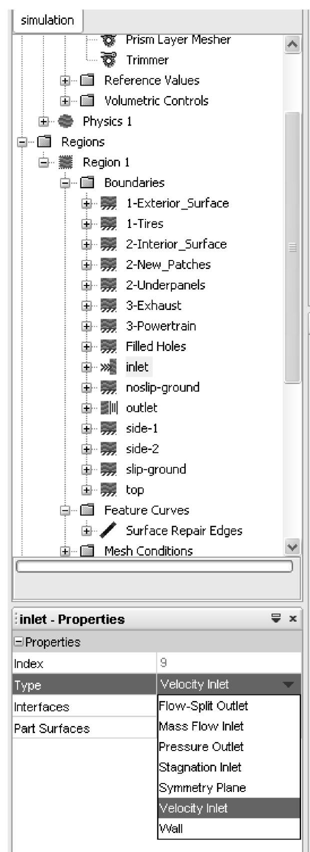


图 4-90　入口边界条件设定

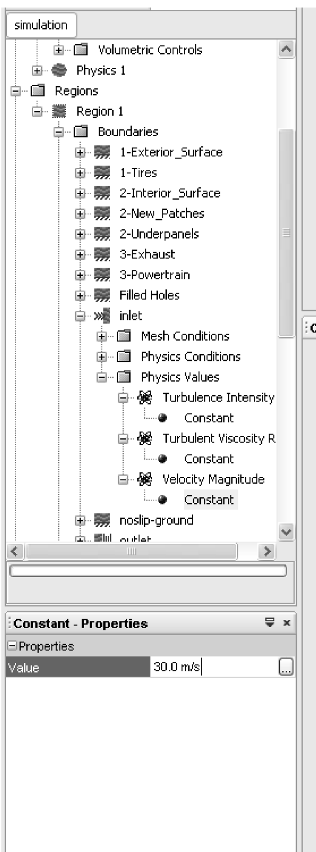


图 4-91　输入入口速度

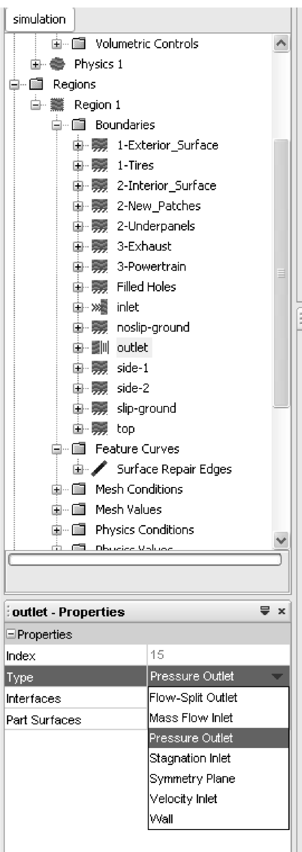


图 4-92　出口边界条件设定

4. 计算域侧面和顶面边界条件

计算域两个侧面和顶面采用滑移边界条件。因为这三个面是虚拟的计算域表面，与壁面边界条件不同，故不用计及摩擦力。

以“side-1”边界为例，进行说明。选择[Regions]>[Region 1]>[Boundaries]>[side-1]，将其设置为“Wall”条件。选择[Regions]>[Region 1]>[Boundaries]>[side-1]>[Physics Conditions]>[Shear Stress Specification]，修改属性栏中“Method”项为“Slip”，将其设置为滑移条件，如图 4-96 所示。

side-2 和 top 的设定与其相同。

5. 地面边界条件

小汽车前端地面“slip-ground”边界和小汽车附近及后部地面“noslip-ground”边界均设置为“Wall”条件。同时，小汽车前端地面设置滑移边界条件；小汽车附近及后部地面设置无滑移边界条件和移动壁面边界条件，以模拟地面与气流的摩擦作用。

选择[Regions]>[Region 1]>[Boundaries]>[noslip-ground]>[Physics Conditions]>[Shear Stress Specification]，修改属性栏中“Method”项为“No-Slip”。

地面采用移动壁面边界条件，以消除假设条件为来流吹袭、列车静止而引起地面附面层对列车气动性能计算的影响。设置地面移动速度与入口来流速度的大小和方向相同。如图 4-97 所示，选择[Regions] > [Region 1] > [Boundaries] > [noslip-ground] > [Physics Conditions] > [Tangential Velocity Specification]属性栏中的“Method”项为“Vector”。修改[Regions] > [Region 1] > [Boundaries] > [noslip-ground] > [Physics Values] > [Velocity] > [Constant]，将属性栏中的速度值改为 30m/s，如图 4-98 所示。

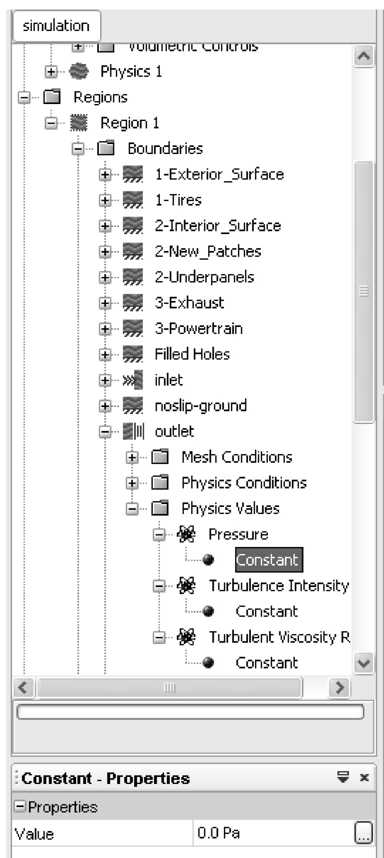


图 4-93　出口压力条件设置

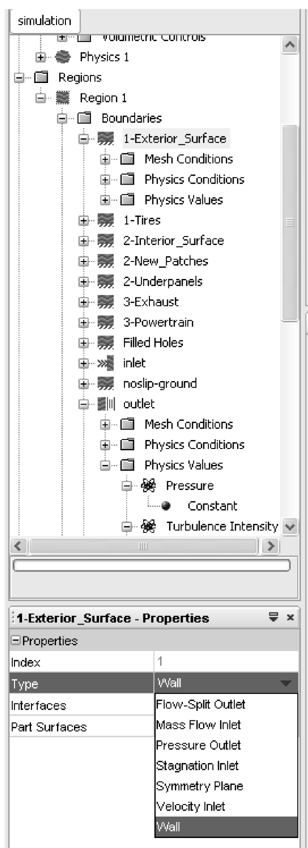


图 4-94　汽车表面壁面条件设定

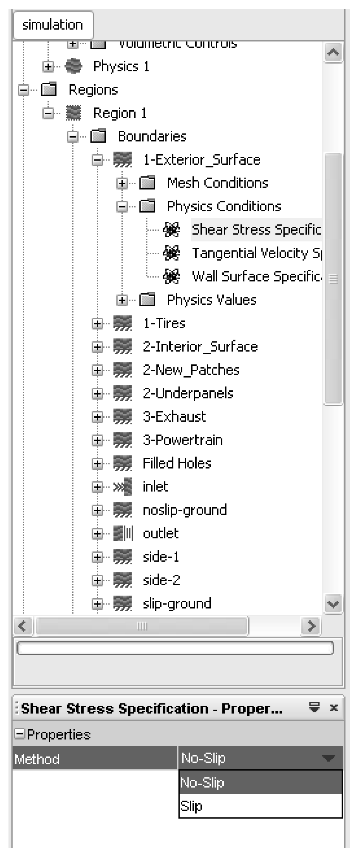


图 4-95　汽车表面无滑移壁面条件设定

注意，小汽车前端地面“slip-ground”边界选择滑移边界条件后，由于不存在地面附面层影响，不用选择移动壁面边界条件，故该选项在软件中也不存在了。

4.2.2　计算模型

依次选择[Space] > [Tree Dimensional]、[Time] > [Steady]、[Material] > [Gas]、[Flow] > [Segregated Flow]（小汽车运行速度较低，空气可视作不可压缩气流，可采用分离式求解方法）、[Equation of State] > [Constant Density]、[Viscous Regime] > [Turbulent]和[Turbulence] > [K-Epsilon Turbulence]。同时选择左侧“Optional Physics Models”中的 Cell Quality Remediation，选择该项可以在计算时自动去除计算效果不好的网格，保证计

算的准确度。所选择的模型均被追加到右侧的[Enabled Physics Models]中，如图 4-99 所示。

为保证计算收敛，选择[Continua]>[Physics 1]>[Models]>[Segregated Flow]，将其属性栏中“Convection”项修改为“1st-order”，选择一阶迎风格式，如图 4-100 所示。这样虽然降低了收敛速度，但保证了计算精度。

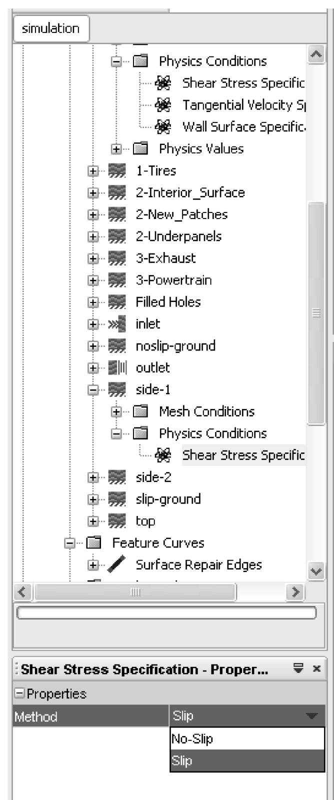


图 4-96 计算域侧面滑移条件设定

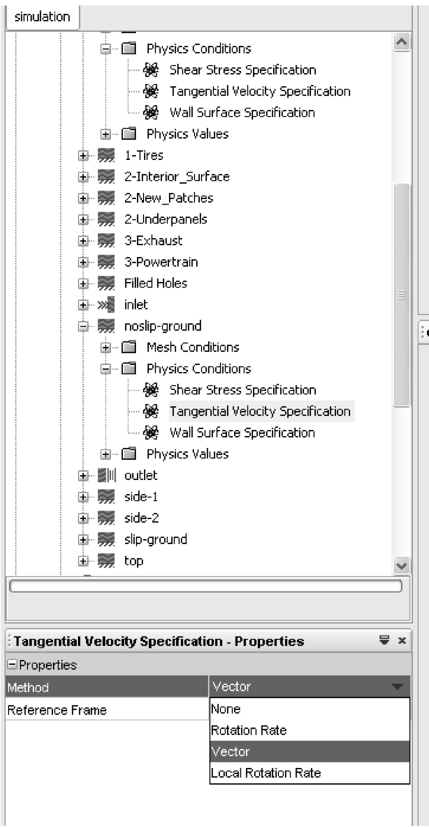


图 4-97 移动壁面边界条件设定

选择[Stopping Criteria]>[Maximum Steps]属性栏中的“Maximum Steps”项，设置计算步数为 6000 步，如图 4-101 所示。

4.2.3 监测曲线的设定

如图 4-102 所示，右键选择[Reports]>[New Report]>[Force Coefficient]，在 Report 下出现一个 Force Coefficient 1 项，创建阻力系数监测工具。为与其他曲线进行区分，可修改 Force Coefficient 1 的名字为“Cd”。阻力系数的详细设置如图 4-103 所示。修改[Reports]>[Cd]属性栏中的相关数据，包括 Reference Density(空气密度)、Reference Velocity(汽车运行速度)、Reference Area(汽车迎风面积)、Direction(力的方向)，同时在“Parts”对话框中将阻力对应的边界从左边移动到右边，如图 4-104 所示。

右键选择[Reports]>[Cd]>[Create Monitor and Plot from Report]，创建阻力曲线图，如图4-105所示。可以看出，树形菜单Monitor和Plots下出现与Reports相同名字的“Cd Monitor”和“Cd Plot”，如图4-106所示。

右键选择[Plots]>[Cd Plot]>[Open]，打开阻力曲线图，如图4-107所示。视图区的曲线图如图4-108所示。

Frontal Area工具的建立方法如图4-109所示，右键选择[Reports]>[New Report]>[Frontal Area]，树形菜单Reports下出现“Frontal Area 1”项，如图4-110所示。由于本例中来流方向为+X方向，在“Frontal Area 1”的属性栏“Normal”项中输入“[1.0,0.0,0.0]”，在“Parts”项中输入与图4-104相同的边界，选择整车形状作为分析目标。

如图4-111所示，右键选择[Reports]>[Frontal Area 1]>[Run Report]，计算车体迎风面积。

输出窗口中显示出汽车迎风面积的计算过程和计算结果，如图4-112所示，计算结果为1.999478m^2，本例中按2m^2计算。

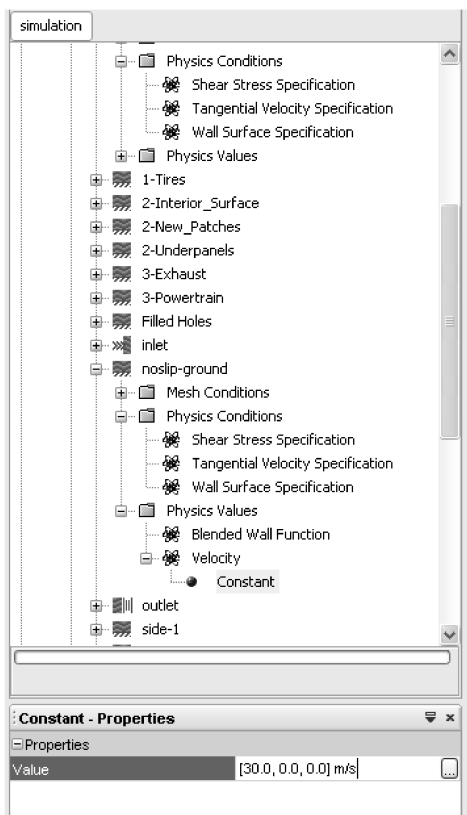


图4-98　设定地面移动速度

按照同样方法，生成升力系数C1的Report项，与阻力系数Cd唯一不同之处在于，升力系数C1属性栏对应的“Direction”项应输入[0.0,0.0,1.0]，如图4-113所示。

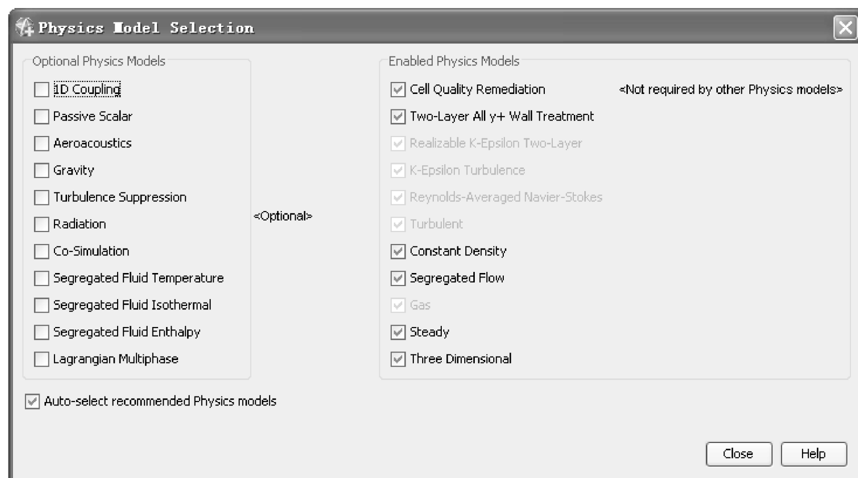


图4-99　所选择的模型

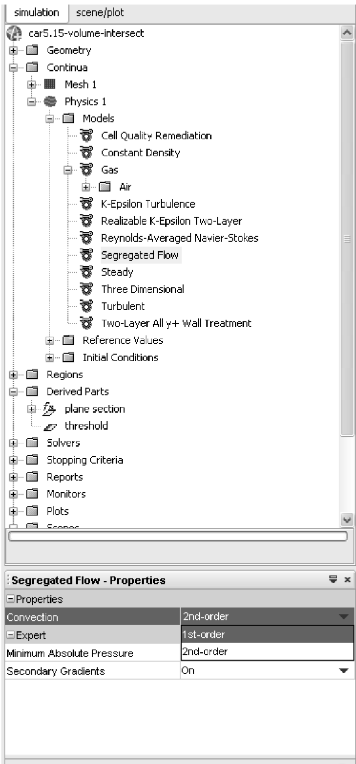


图 4-100　选择一阶迎风格式

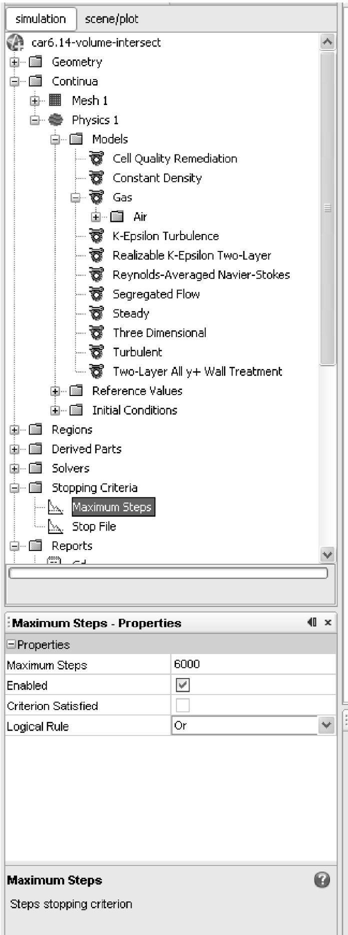


图 4-101　设置计算步数

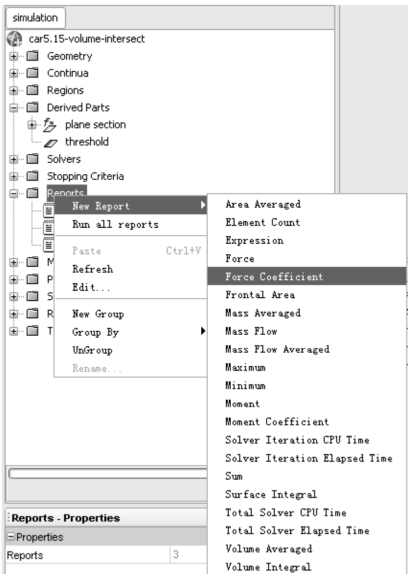


图 4-102　创新建阻力系数监测工具

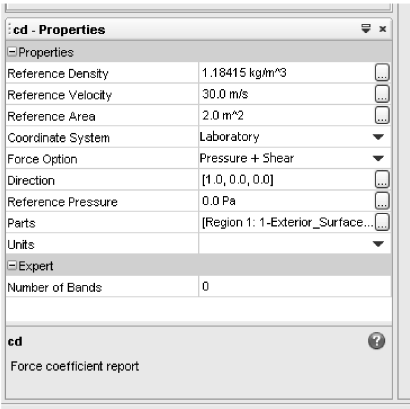


图 4-103　阻力系数设置

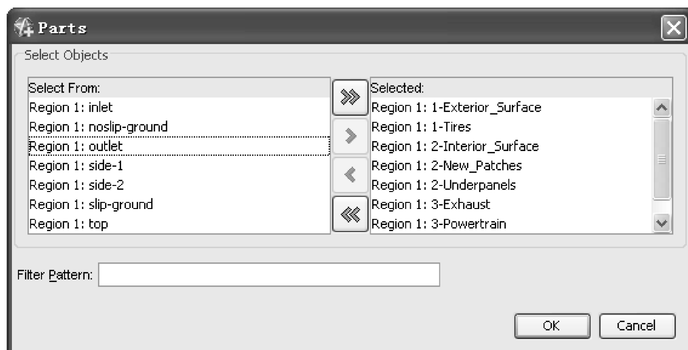


图 4-104　选定阻力系数对应的 Parts

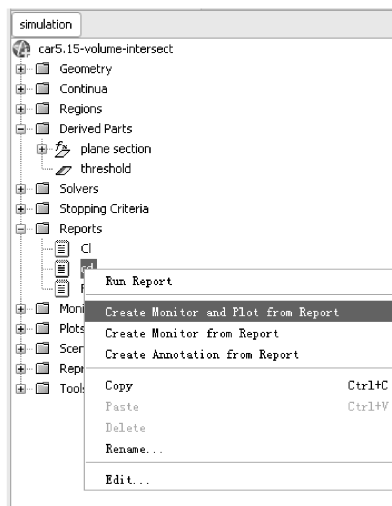


图 4-105　创建阻力曲线图

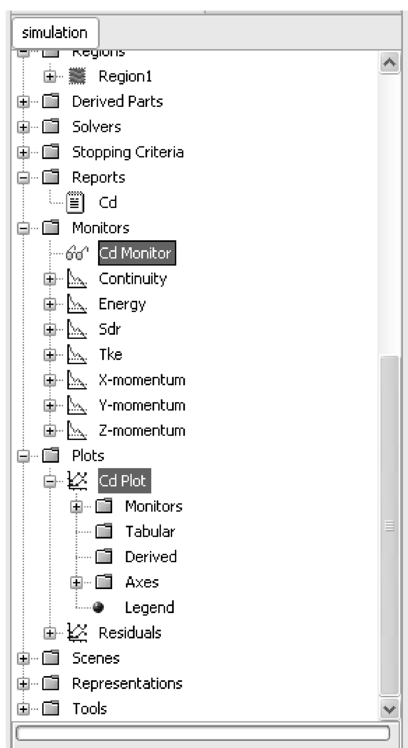


图 4-106　Cd Monitor 和 Cd Plot 选项

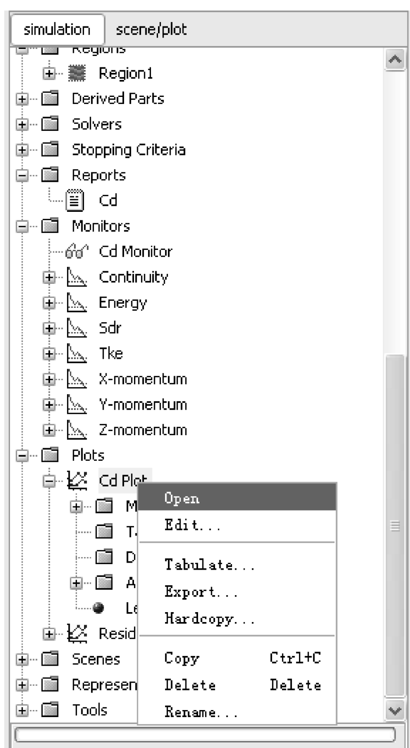


图 4-107　打开 Cd Plot

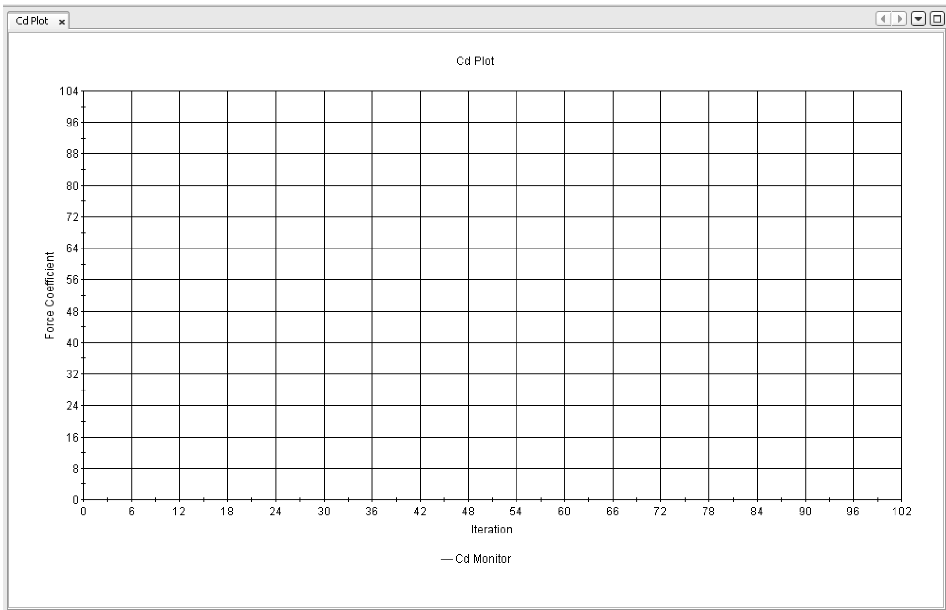


图 4-108　Cd Plot 窗口

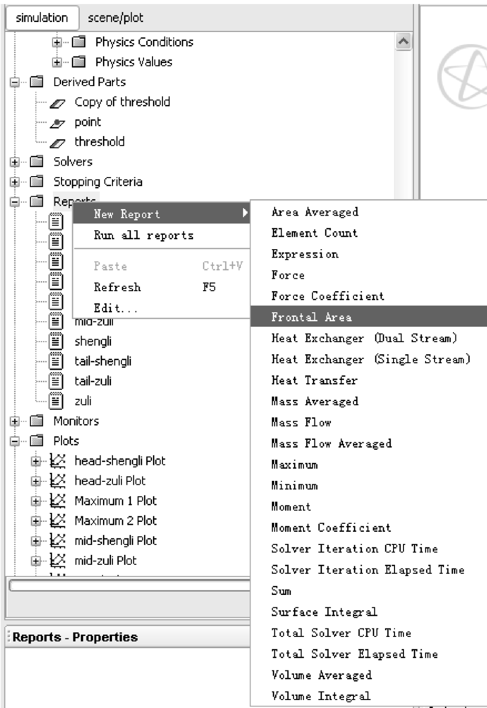


图 4-109　建立 Frontal Area 工具

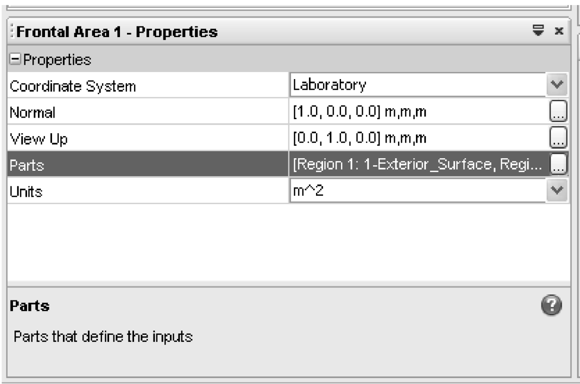


图 4-110　Frontal Area 1 属性栏设置

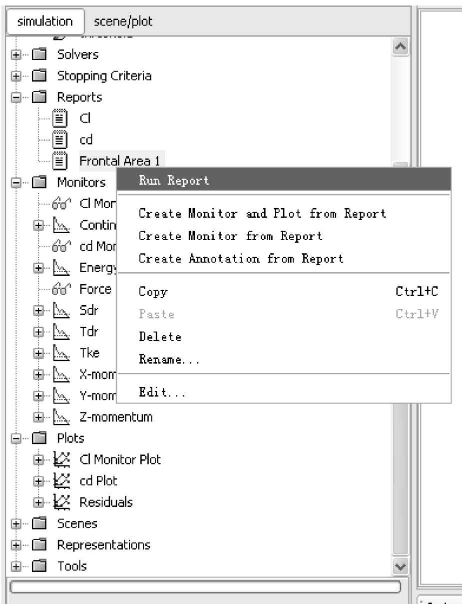


图 4-111　计算汽车迎风面积

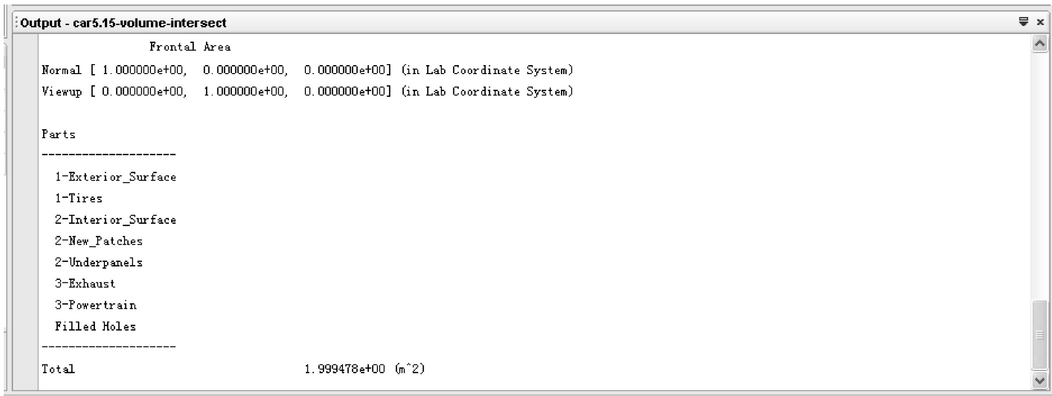


图 4-112　汽车迎风面积的计算结果

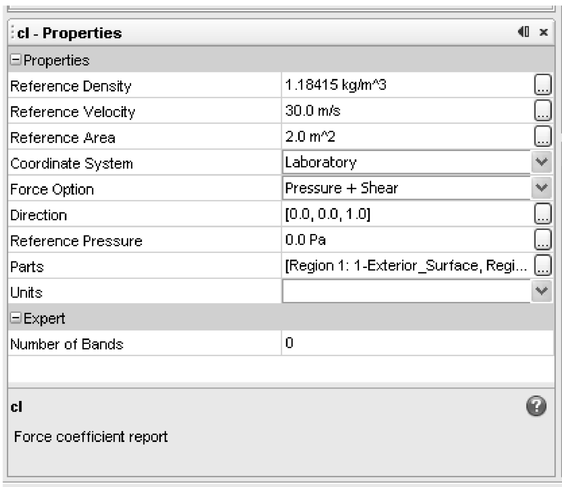


图 4-113　升力系数 C1 对应的方向设置

4.3 后处理

4.3.1 计算结果的统计

点击工具栏按钮，开始计算。计算过程中的残差曲线如图4-114所示。阻力系数和升力系数的收敛曲线分别如图4-115和图4-116所示。由图可以看出，Cd值和Cl值分别为0.255和0.07左右。

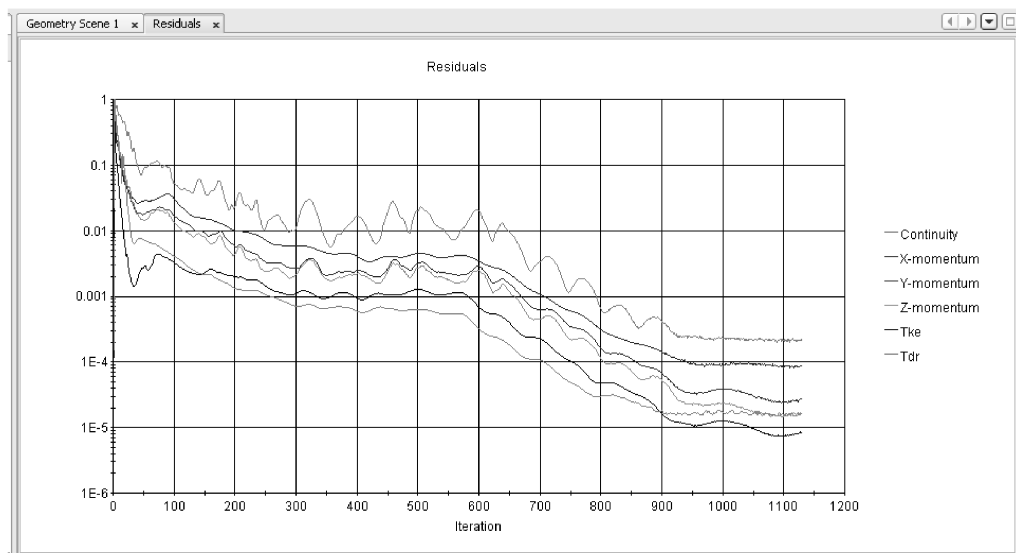


图4-114 残差曲线

4.3.2 车体表面压力分布的显示

右键选择[Scenes]>[New Scene]>[Scalar](图4-117)，或点击工具栏图标[Create/Open Scenes]>[Scalar](图4-118)，在视图区显示压力云图。选择[Scenes]>[Scalar Scene 1]>[Displayers]>[Scalar 1]>[Parts]，在属性栏“Parts”项中选择要显示的所有车体表面边界。

同时选择属性栏“Function”项为“Pressure”方式，显示汽车表面压力。如图4-119所示。

汽车表面压力云图如图4-120所示。从属性栏和视图区压力图标可以看出车体表面的压力值范围。旋转视图可以看出，小汽车前部正压值较大，尾部负压值较大，前后部压差正是引起汽车运行阻力的重要因素。

在[Scenes]>[Scalar Scene 1]>[Displayers]>[Scalar 1]>[Parts]中增加显示截面“plane section”，显示流场中汽车中间截面压力云图，如图4-121所示。

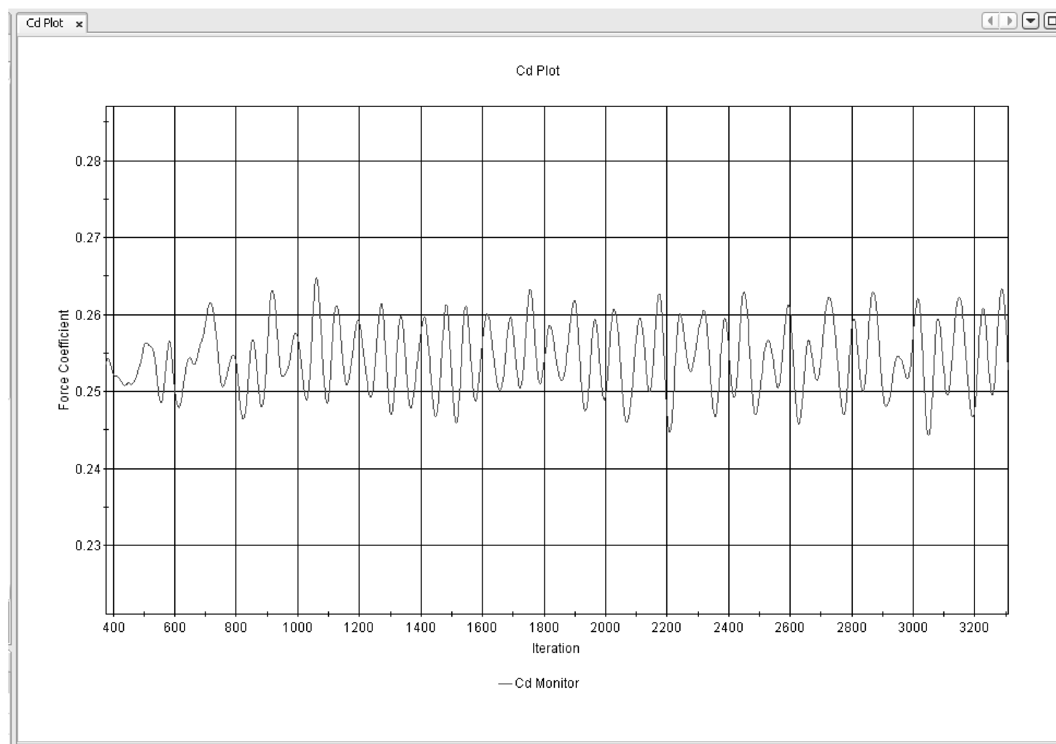


图 4-115　Cd 收敛曲线

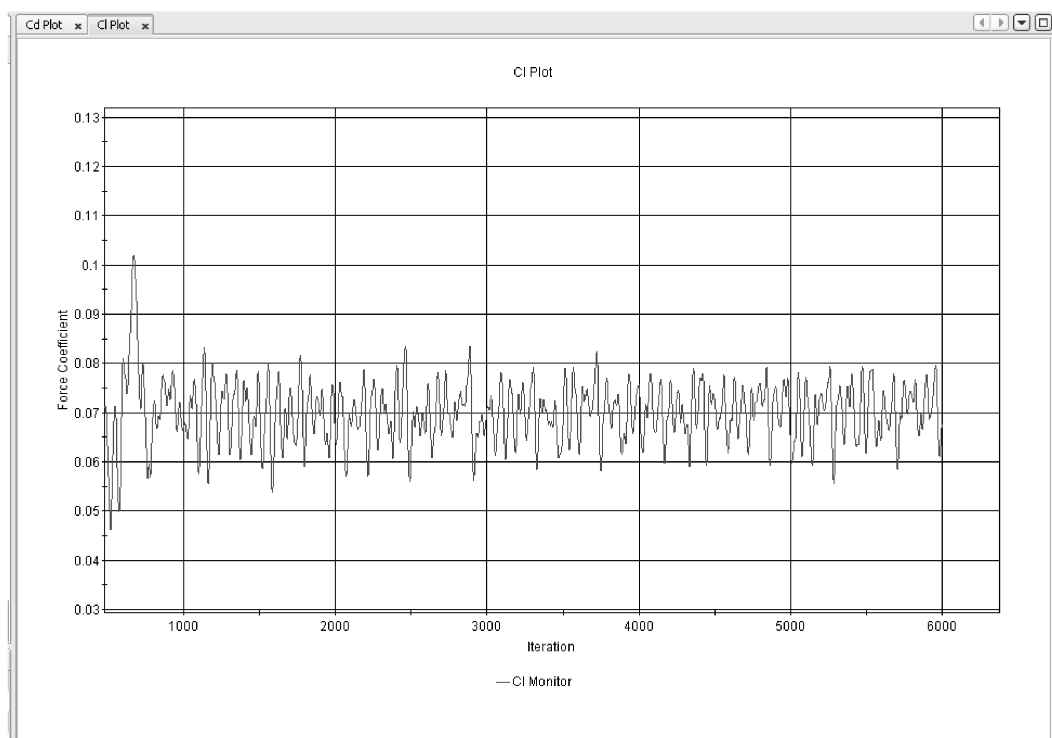


图 4-116　Cl 收敛曲线

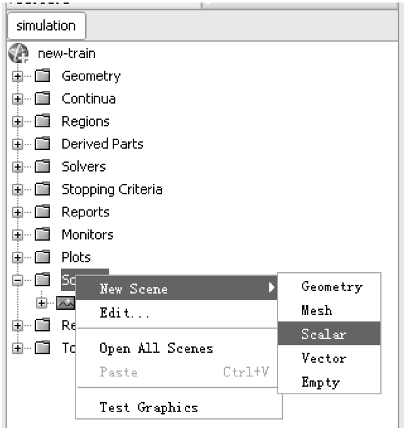


图 4-117　通过树形菜单创建 Scalar

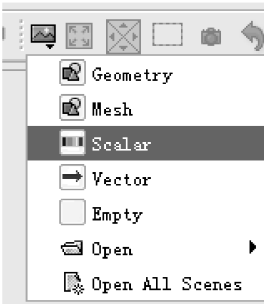


图 4-118　通过工具栏创建 Scalar

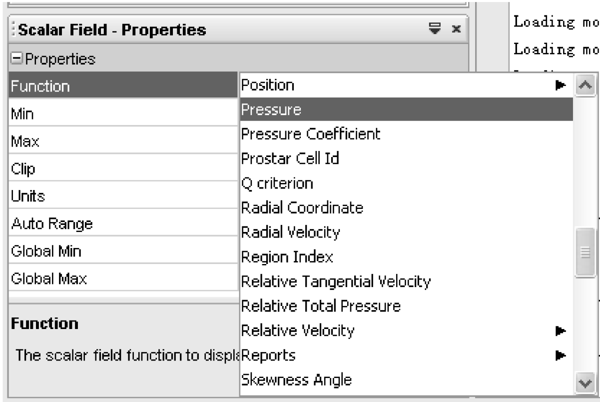


图 4-119　显示汽车表面压力

4.3.3　汽车中间截面流场的显示

右键选择[Scenes] >[New Scene]>[Vector]，新建矢量视图，如图 4-122 所示。在[Scenes] >[Vector Scene 1]>[Displayers]>[Vector 1]>[Parts]中增加显示截面“plane section”，同时选择[Scenes] >[Vector Scene 1]>[Displayers]>[Vector 1]属性栏中“Vector Scale”项为“Absolute”，如图 4-123 所示。

汽车车身附近的流场如图 4-124 所示。可以看出，来流在汽车前部滞止为高压，故前部速度较低；同时车的尾部产生两个尾涡流。

如果将[Scenes] >[Vector Scene 1]>[Displayers]>[Vector 1]属性栏中“Vector Length”项由“Vector Magnitude”改为“Constant Length”（图 4-125），就将流场矢量图由真实大小的矢量改为大小相等的矢量的显示方式，如图 4-126 所示。

选择菜单[File] >[Save as...]，在“保存”对话框中输入文件名“car”，如图 4-127 所示。点击“保存”按钮，保存以上所有操作。

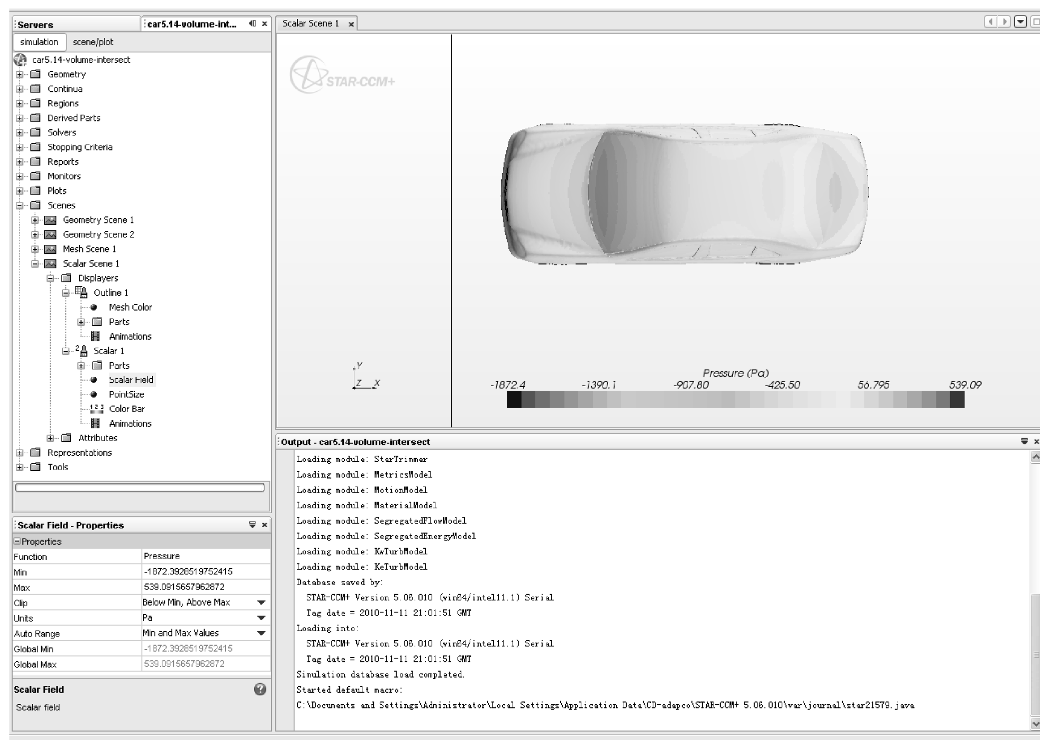


图 4-120　汽车表面压力云图

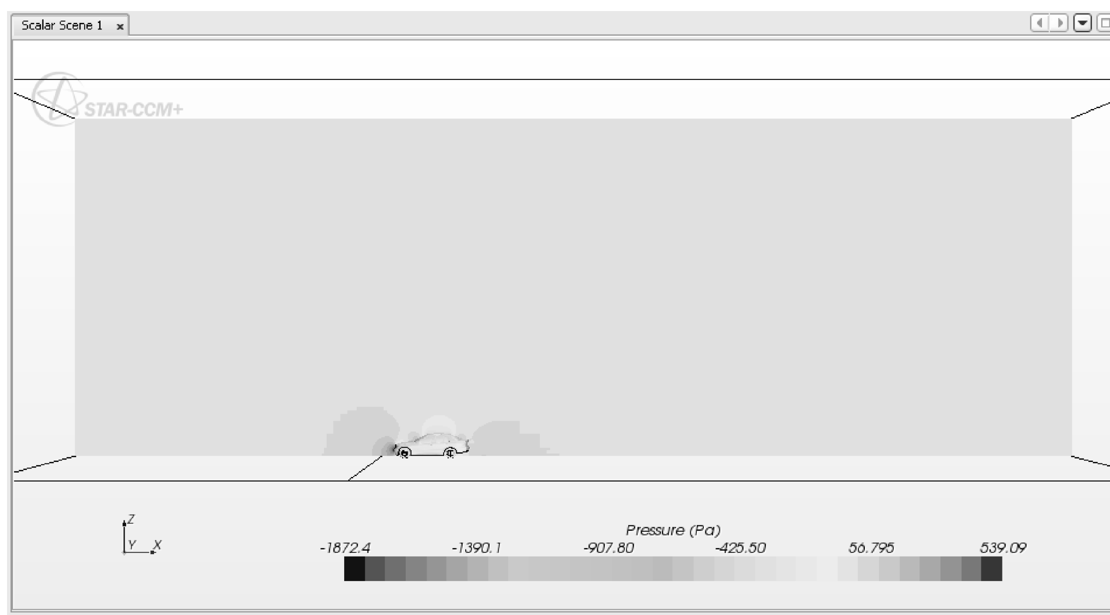


图 4-121　汽车中间截面压力云图

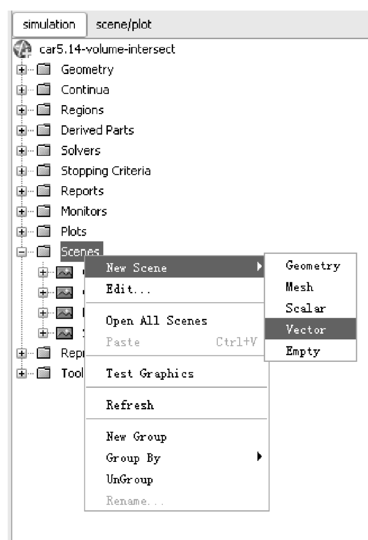


图 4-122 新建矢量视图

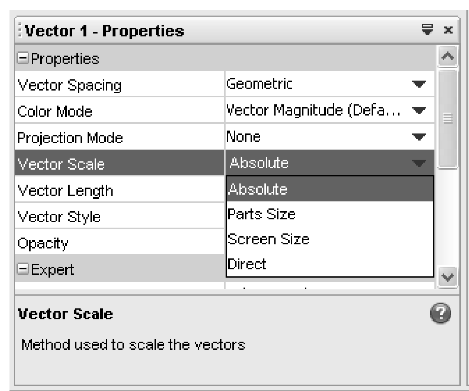


图 4-123 制作流线

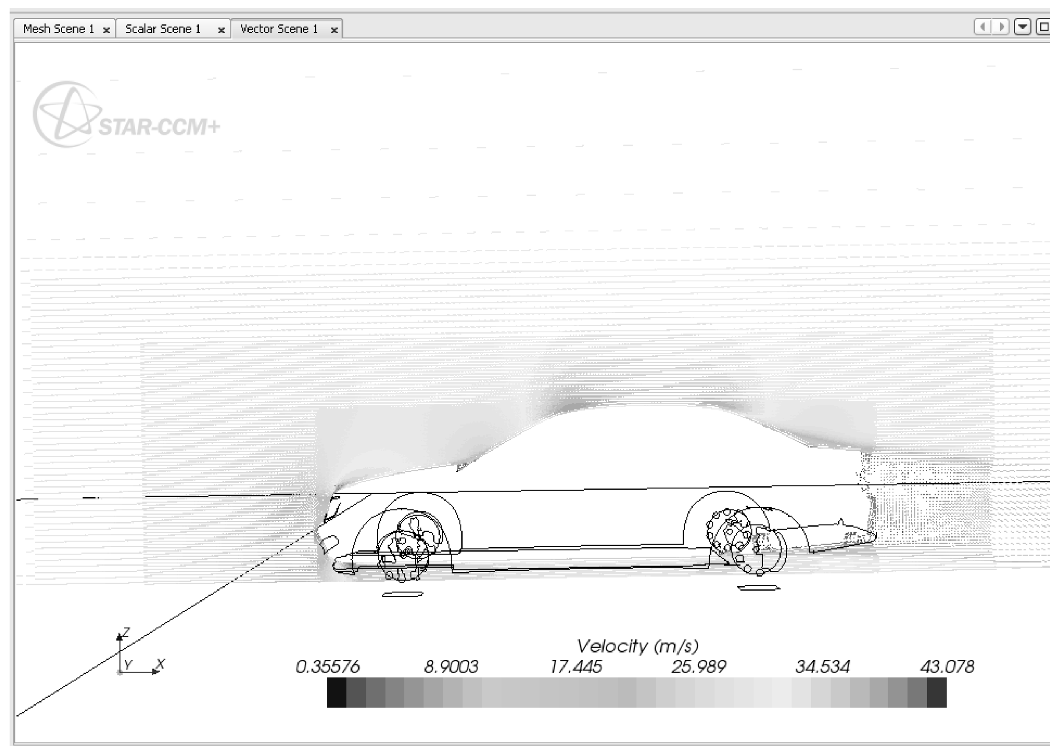


图 4-124 汽车车身附近的流场

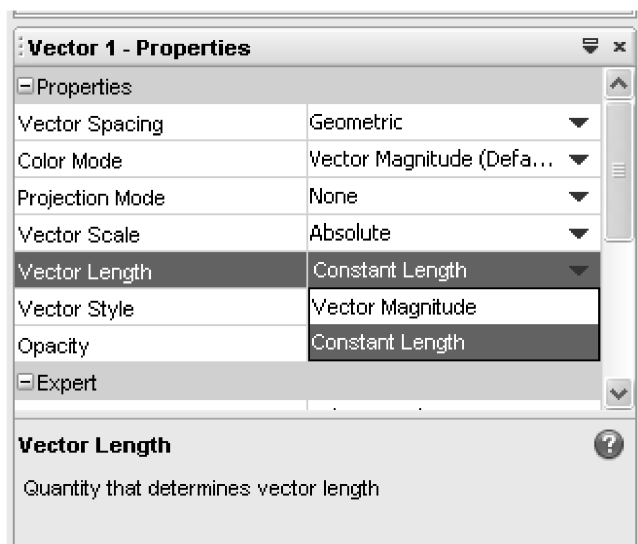


图 4-125　修改矢量大小显示方式

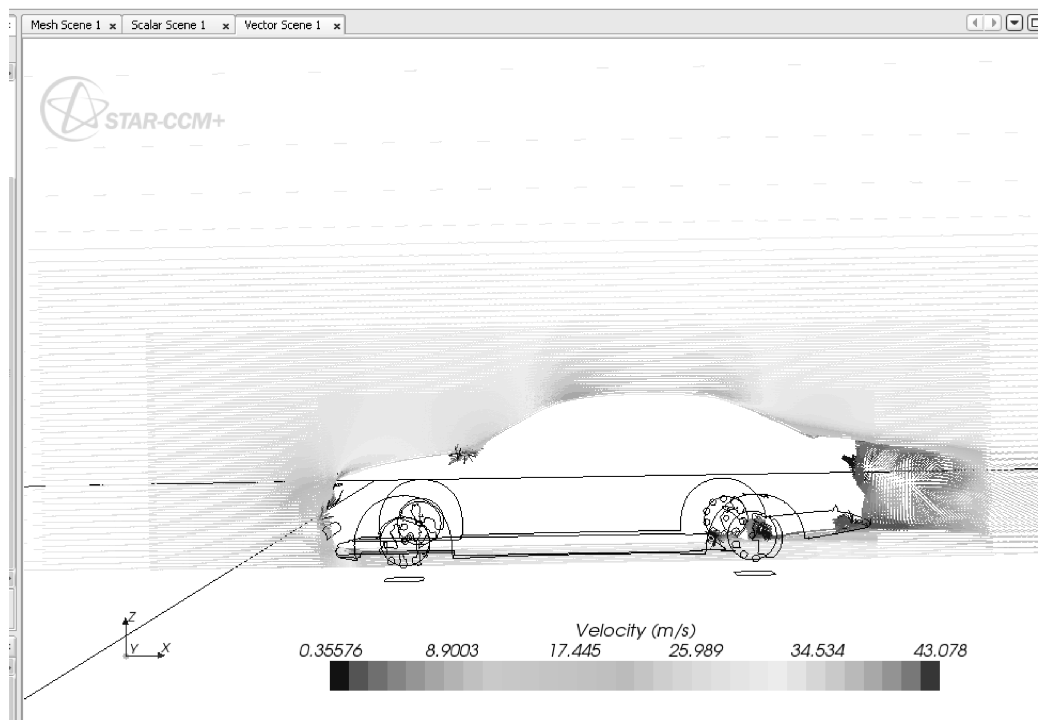


图 4-126　修改后的流线矢量图

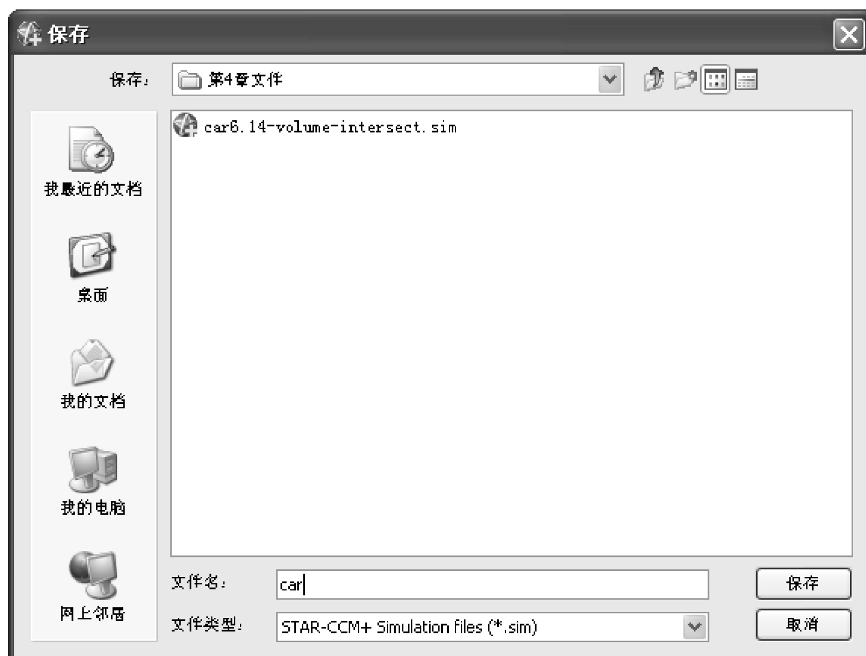


图 4-127 保存计算文件

第 5 章　列车空气动力学性能计算

由于速度较高，空气阻力较大，高速动车车头形状比普速列车的钝头要长。本章以一个示例性的三辆编组高速动车模型进行高速动车外流场计算，如图 5-1 所示。

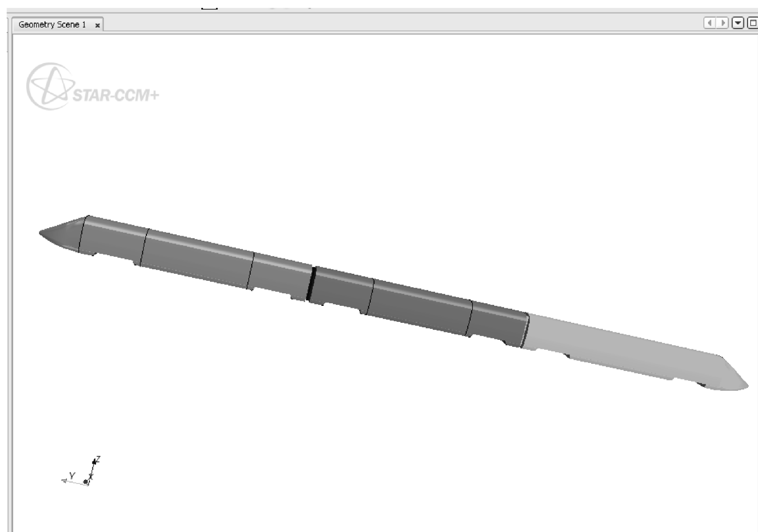


图 5-1　车体外形

本文涉及的高速动车组及空气动力学性能方面的专业术语包括以下几点。

头车：列车前进运行时，编组在列车最前端的一辆车，包括车体、空调导流罩、车头、转向架。

尾车：列车前进运行时，编组在列车尾端的最后一辆车，包括车尾、车体、空调导流罩、转向架。

中间车：编组在头尾车之间的所有车辆，包括车体、空调导流罩、受电弓及导流罩和转向架。

风挡：车辆之间连接部件，形式有内风挡、半外封闭风挡和全封闭风挡。风挡包括两车之间连接件及两车端墙。

横风：风向与列车运行方向垂直的环境风。

整车阻力：头车阻力 + 风挡阻力(两个风挡) + 中车阻力 + 尾车阻力。

阻力系数：

$$c_x = \frac{F_x}{qS_x} \tag{5-1}$$

升力系数：

$$c_y = \frac{F_y}{qS_x} \tag{5-2}$$

横向力系数：

$$c_z = \frac{F_z}{qS_x} \quad (5\text{-}3)$$

动压

$$q = \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (5\text{-}4)$$

式中 v——列车速度；

F_x——列车空气阻力，即列车压差阻力和列车空气摩擦阻力之和；

F_y——列车空气升力；

F_z——列车空气横向力；

S_x——参考面积，指列车最大横截面积。

5.1 模型处理及网格

5.1.1 车体模型的导入和组装

对高速列车进行模型处理、网格划分及求解的思路如图 4-2 所示。

1. 导入车体模型

点击[File]>[New]，新建仿真任务，弹出“Create a New Simulation”对话框，如图 5-2 所示。

在弹出的“Create a New Simulation”对话框中，在“Run Mode”运行模式栏中选择“Parallel”并行运算方式，对话框面板扩展为图 5-3 中的形式。由于本章需划分大量网格，

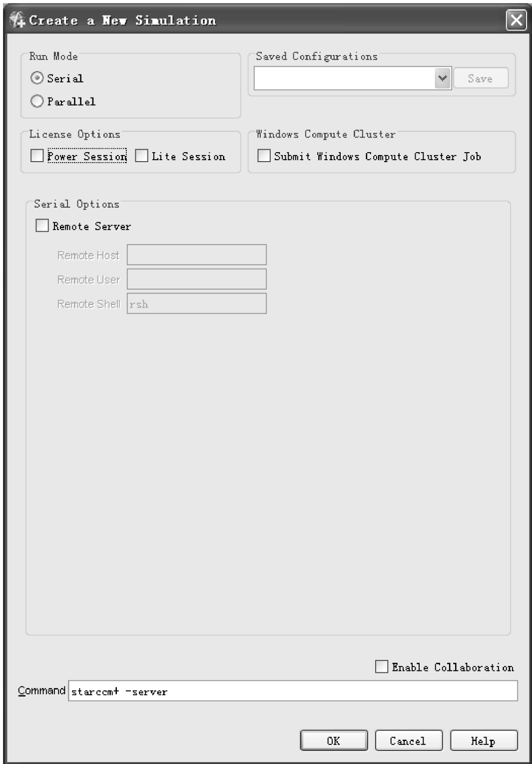


图 5-2 创建新的模拟

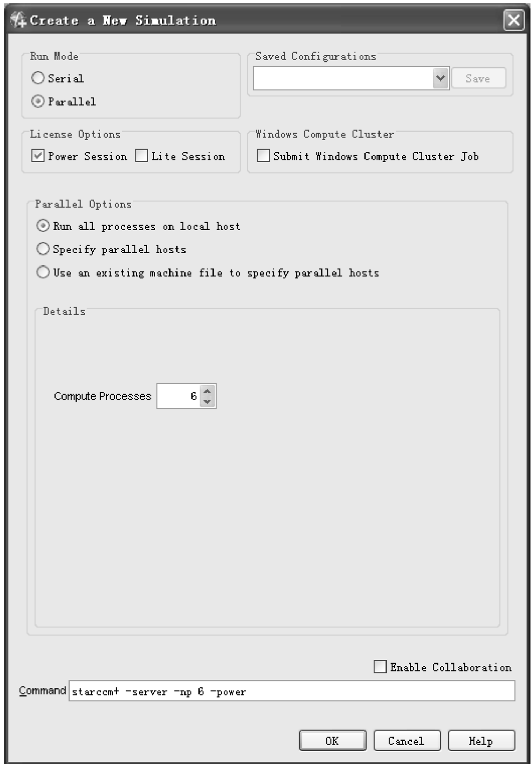


图 5-3 选择并行运算方式

计算时采用多核并行运算方式可以提高计算速度。

在“License Option”栏中选择“Power Session”方式，在“Parallel Options”栏中选择“Run all processes on local host”方式，最后在“Compute Processes”栏中输入数字6，选择6核并行方式。

本章的例子在计算机仅能进行单核运算的情况下也能进行计算，但这样速度较慢，且一定要保证计算机内存不少于8GB 的容量。

保持其他设置不变，点击“OK”按钮，完成新建任务。

点击工具栏上的“ ”按钮，在弹出的对话框中选择文件“middle. dbs”、“fengdang. dbs”和“tail. dbs”。点击“打开”按钮，导入尾车和中间车模型，如图 5-4 所示。



图 5-4　导入尾车、中间车和风挡模型

点击“OK”按钮，弹出如图 5-5 所示的网格导入对话框。

如图 5-6 所示，将“Region Mode”项改为“One region per file”，将尾车、风挡和中间车分为不同区域显示。

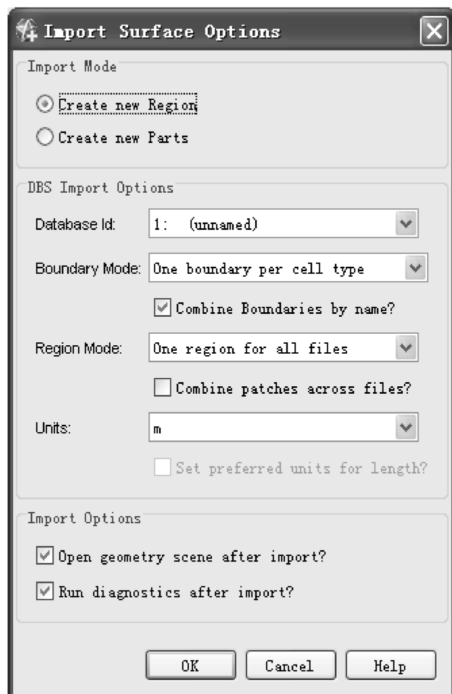


图 5-5　网格导入对话框

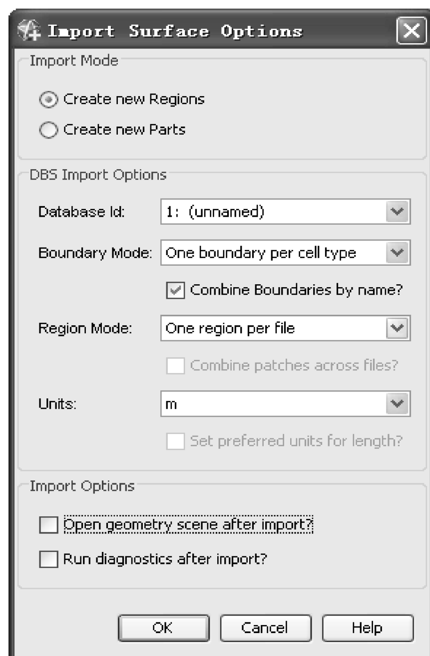


图 5-6　改变 Region Mode

由于所导入列车模型以 m 为单位，其余选项采用默认设置即可，点击“OK”按钮，完成车体文件导入。打开车体视图，如图 5-7 所示，右键点击[Scenes] > [New Scene] > [Geometry]。视图区出现导入后的车体。如图 5-8 所示，左侧“Region”栏中的“middle”、“fengdang”和“tail”三个 Region 分别对应车体的三个部位。

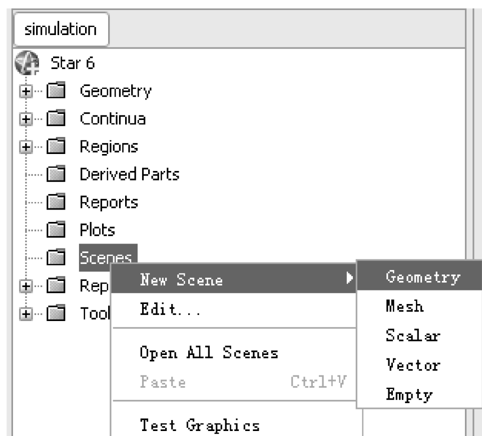


图 5-7 打开车体视图

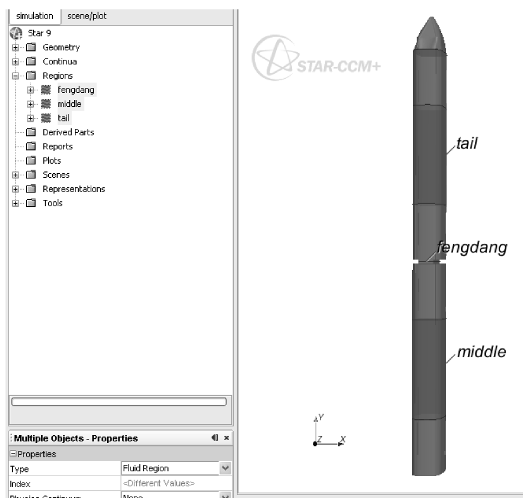


图 5-8 导入后的车体

再次导入“tail. dbs”和“fengdang. dbs”，如图 5-9 所示。



图 5-9 再次导入头车和风挡模型

在弹出的对话框中，将“Region Mode”项改为“One region for all files”，将头车和风挡作为一个区域显示，如图 5-5 所示。

2. 车体模型的组装

导入完成后，左侧“Region”栏中新增“Region 1”。如图 5-10 所示，右键点击[Region 1] > [Rename]，修改该区域的名称。为区别显示各部分车体，将头车和中间车透明化显示，而被选中的尾车则为深色显示。

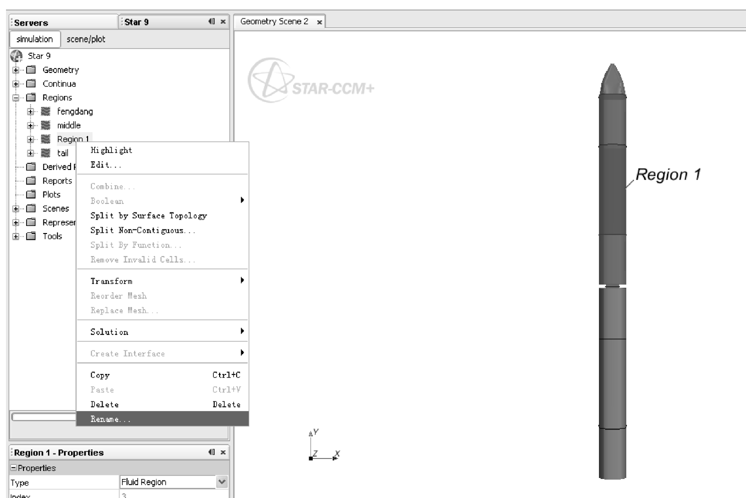


图 5-10　修改 Region 1 的名字

在弹出的对话框中(图 5-11)，输入“head”，点击“OK”按钮，确认操作。

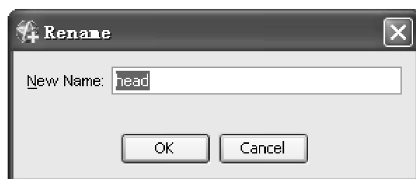


图 5-11　输入所修改的名称

此时 tail 区域和 head 区域实际上是重叠的，需要对 head 区域进行镜像和平移操作，以将其放置于尾车区域。可采用两种方法解决以上问题。

第一种方法是：建立局部坐标系，按照局部坐标系进行镜像，再沿着列车长度方向，即 Y 轴平移中间车长度的距离，即可得到三辆编组列车模型。具体操作如下：

1）建立局部坐标系。如图 5-12 所示，右键选择[Tools] > [Coordinate Systems] > [Laboratory] > [Local Coordinate Systems] > [New] > [Cartesian]，建立新坐标系。打开“Create Cartesian Coordinate Systems”对话框，在 Origin 项中 Y 轴坐标处输入“middle”边界沿 Y 轴中点处的坐标值，如图 5-13 所示，然后点击“Create”按钮，建立局部坐标系。

2）右键选择[Regions] > [head] > [Transform] > [Reflect...]，如图 5-14 所示。

在出现的“Reflect Regions”对话框(图 5-15)中，在“Normal Vector”法向量一栏中输入 Y 轴值为 1，在“Coordinate System”下选择新建的局部坐标系“Laboratory > Cartesian 1”，点击“Apply”按钮，即完成 head 在局部坐标系 1 下沿 Y 轴进行镜像的操作。

第二种方法是：右键选择[Regions] > [head] > [Transform] > [Reflect...]，打开“Reflect Regions”对话框(图 5-15)，在“Normal Vector”法向量一栏中输入 Y 轴值为 1。尾车位置变化后的效果如图 5-16 所示。

点击工具栏按钮[Save-Restore-Select views] > [Standard Views] > [(+Z)top]，如图 5-17 所示，图中的列车显示为 +Z 方向的视图，以便于测量距离。

使用工具栏中的▭工具，测量得到中间车的距离为 26.9m，如图 5-18 所示。

点击[Regions] > [head]，右键选择[head] > [Transform] > [Translate]，如图 5-19 所示。

在出现的“Translate Regions”对话框中，在“Translation Vector”法向量一栏中输入 Y

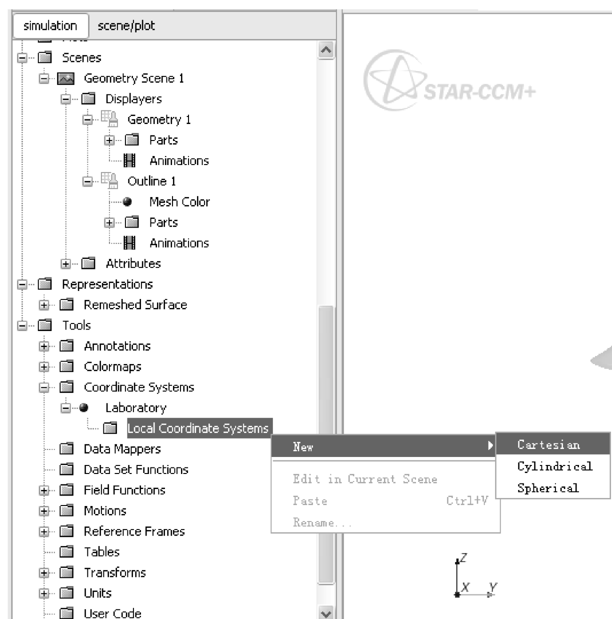


图 5-12　建立新坐标系

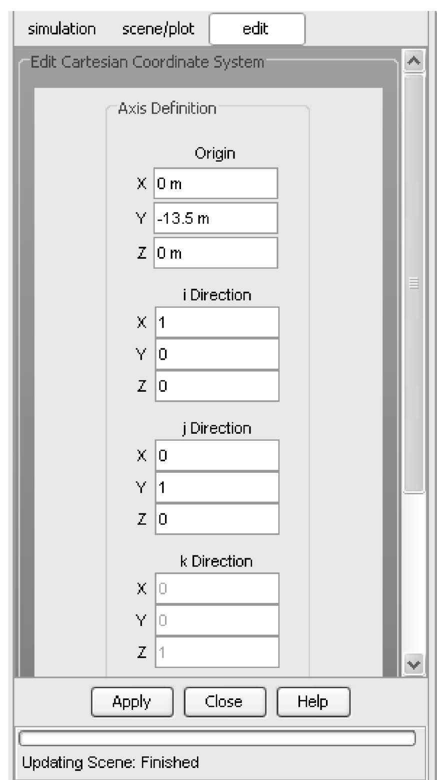


图 5-13　建立局部坐标系

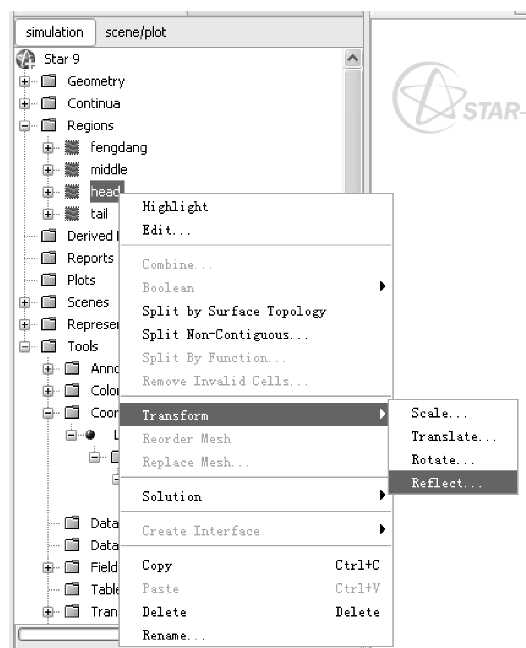


图 5-14　选择镜像功能

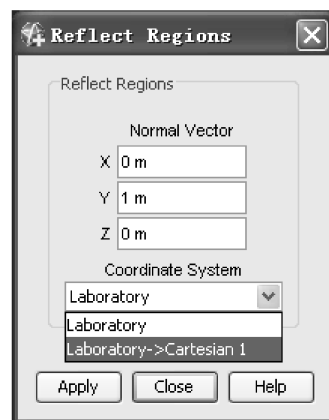


图 5-15　选择 Y 轴进行镜像操作

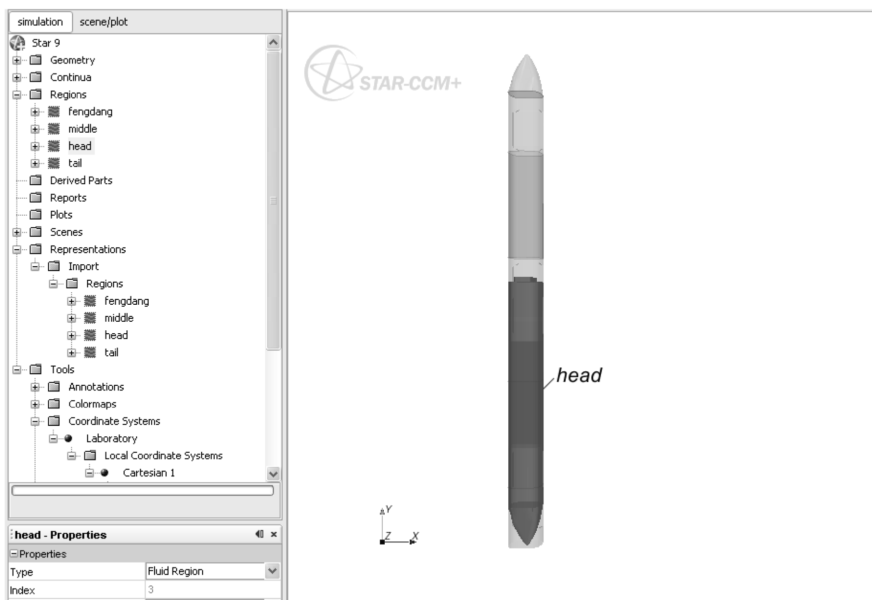


图 5-16　Reflect 变换后的尾车

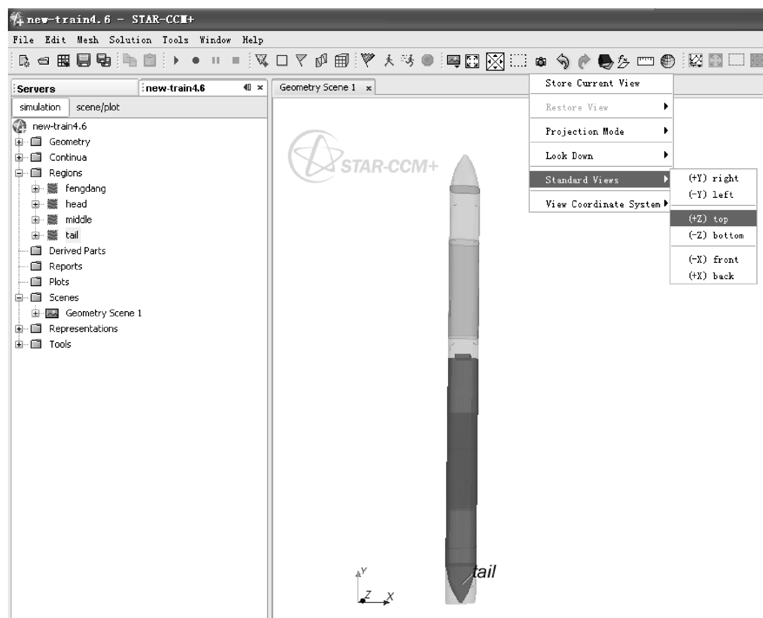


图 5-17　选择视图方向

轴值为 -26.9m，即“head”沿 Y 轴平移 -26.9m，确定输入平移方向和距离，如图 5-20 所示。

双击［Scenes］>［Geometry Scene 1］>［Displayers］>［Geometry 1］>［Parts］，出现图 5-21 中的对话框。点击 » 按钮，将左侧“Select From”栏中的 Boundary 全部选入右侧“Selected”栏中。

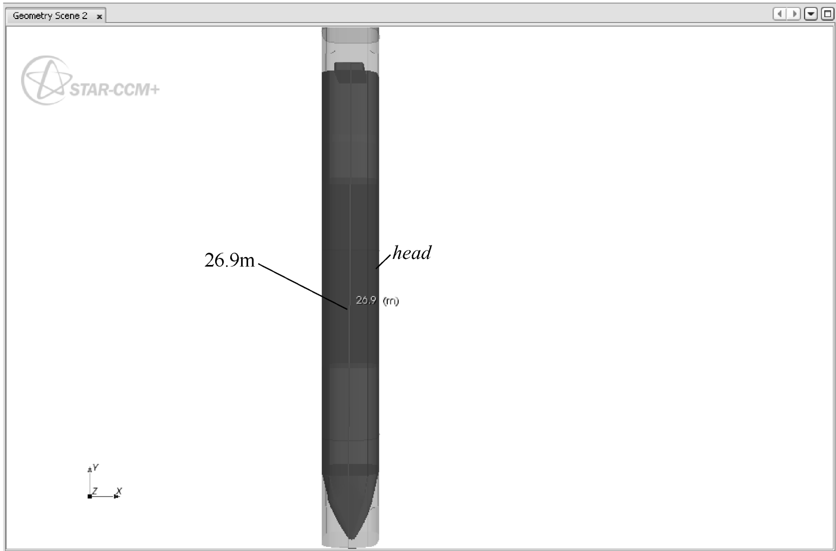


图 5-18 测量平移距离

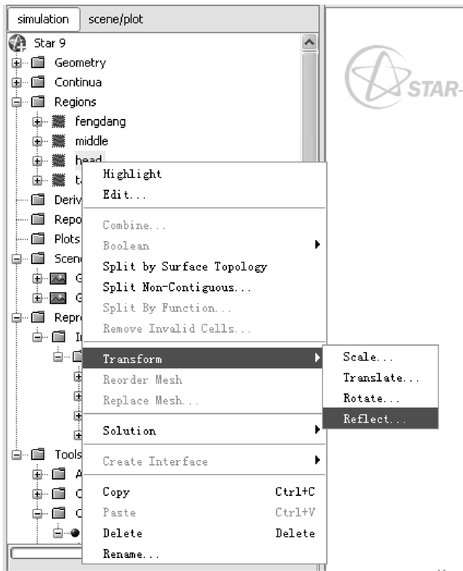


图 5-19 选择平移功能

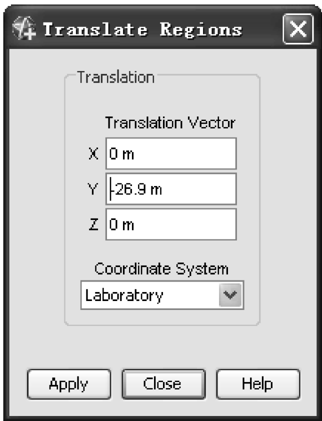


图 5-20 输入平移方向和距离

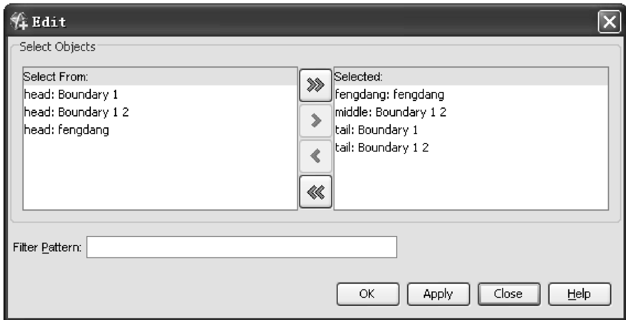


图 5-21 Parts 选择对话框

至此三辆编组的车体全部导入成功，车体全部显示如图 5-22 所示。

如表 5-1 所示，修改各个 Region 中 boundary 的名称，以区分车体的各部位。修改后各 boundary 的名称如图 5-23 所示。

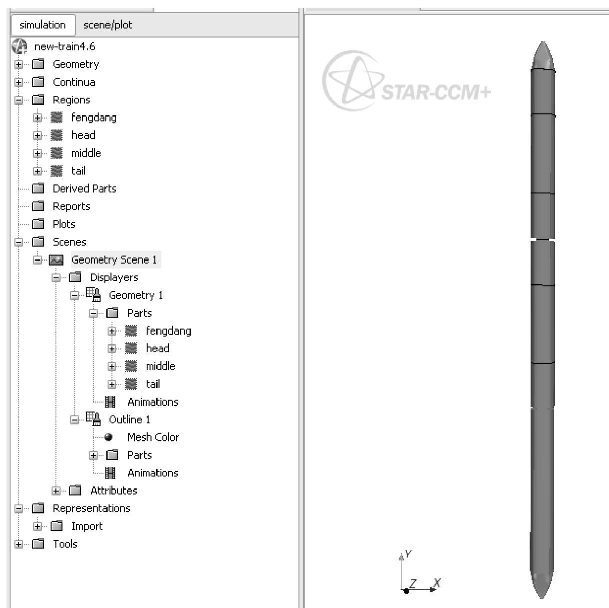


图 5-22　车体全部显示

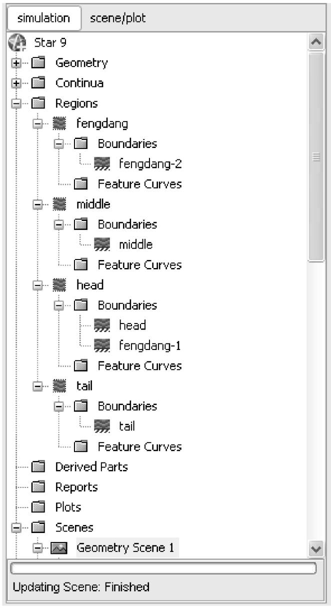


图 5-23　修改后各 boundary 的名称

表 5-1　修改 boundary 的名称

Region 名称	boundary 修改内容
fengdang	将“fengdang”的名称变更为“fengdang-2”
middle	将“Boundary 1 2”的名称变更为“middle”
head	合并“Boundary 1”和“Boundary 1 2”，修改名称为“head” 将“fengdang”的名称变更为“fengdang-1”
tail	合并“Boundary 1”和“Boundary 1 2”，修改名称为“tail”

5.1.2　面网格生成和检查

1. 检查 Import 网格质量

右键选择 [Representations] > [Import] > [Repair Surface]，出现“Surface Preparation Options”对话框，勾选前四项检查任务，如图 5-24 所示。点击“OK”按钮，出现 Surface Diagnostics 对话框，可以看出有问题的面、线、点个数较多，需要进行包面，如图 5-25 所示。

2. 选择网格模型

首先选择“Surface Wrapper”工具，包面时可采用较小尺寸，以保证局部特征的网格精细化，右键选择 [Continua] > [Mesh1] > [Select Meshing Models]，出现“Meshing Model Selection...”对话框，如图 5-26 所示，然后选择需要的网格模型。

包面网格尺寸采用表 5-2 中的数据。

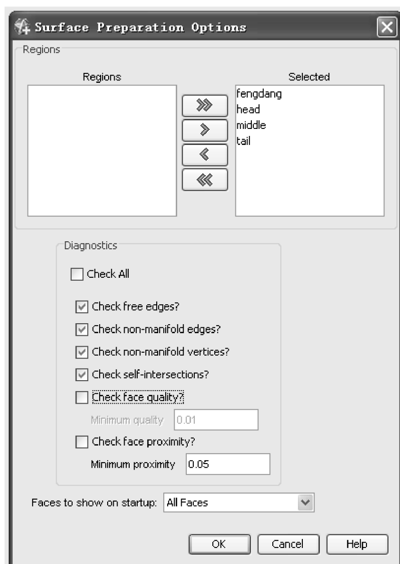


图 5-24 包面前网格质量检查

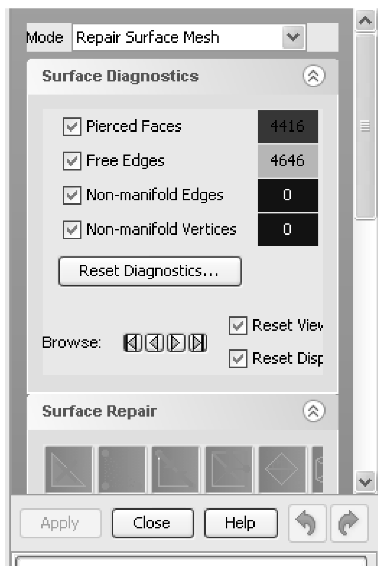


图 5-25 网格质量检查结果

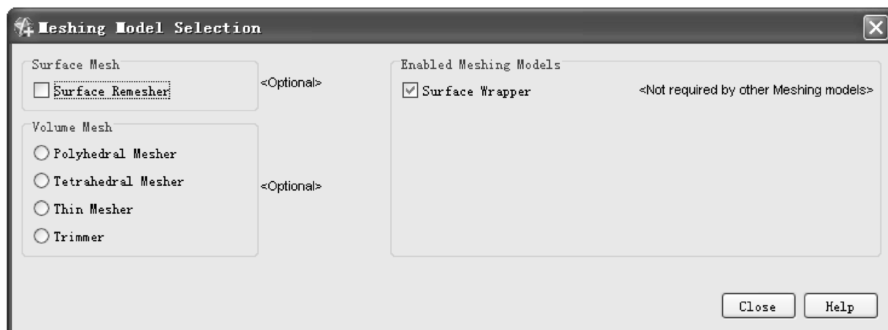


图 5-26 选择“Surface Wrapper”工具

包面后进行网格质量提升，选择“Surface Remesher”工具，重构时可采用较大尺寸，以简化平滑过渡的车体表面的网格，如图 5-27 所示。

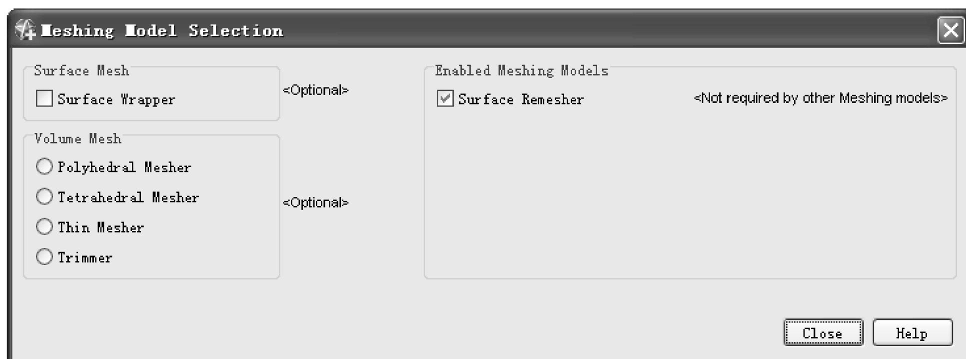


图 5-27 选择“Surface Remesher”工具

重构网格尺寸采用表 5-2 中的数据。

表 5-2　包面网格和重构网格尺寸设置

	Relative Target Size(相对目标尺寸)/m		Relative Minimum Size(相对最小尺寸)/m		Base Size (基本尺寸)/m
	百分比	具体尺寸	百分比	具体尺寸	
包面网格	2%	0.02	1%	0.01	1
重构网格	5%	0.05	2%	0.02	1

注：如练习时所用的电脑性能不够强大，可采用较大网格尺寸，以减少面网格和体网格数量。

3. 包面操作

由于包面操作仅能针对单 Region 进行，故需在进行包面前将“head”、“fengdang”、“middle”、“tail”这四个 Region 合并，并改名为“Region1”。

在确定包面尺寸后，利用包面功能中的检查漏洞工具进行漏洞检查，确定在此包面尺寸下是否存在漏洞。

右键选择[Continua] > [Mesh1] > [Models] > [Surface Wrapper] > [Run Leak detection...]，出现“Wrapper Leak Detection”对话框。在检查漏洞时，需要建立两个点，即 Source Point 和 Target Point1，分别对应图中的车外和车内两点，如图 5-28 所示。通过鼠标点击两点，移动到合适的位置，点击“Recompute Template + Paths”按钮，在输出窗口中会提示是否有漏洞存在。如存在漏洞，会显示漏洞位置，可通过修补工具进行修补，然后点击“Recompute Paths”按钮继续检查。如不存在漏洞，则直接包面。

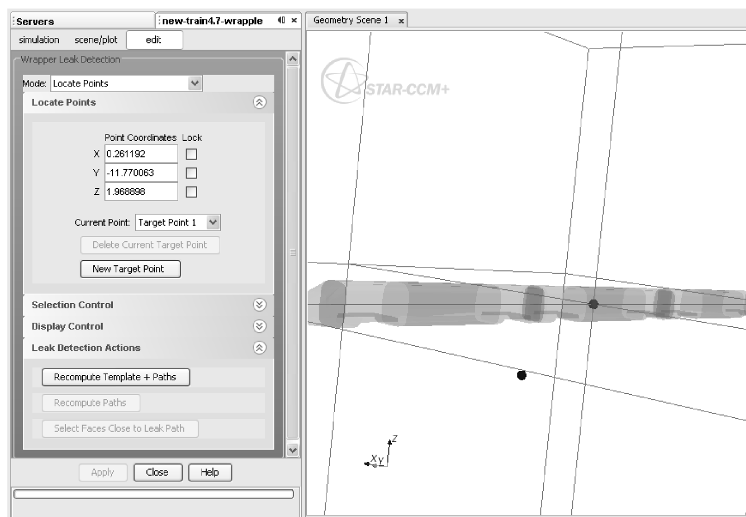


图 5-28　检查漏洞

选择包面方式，点击[Regions] > [Region1] > [Mesh Conditions] > [Volume of Interest Specification](图 5-29)。此处选择列车最大外表面，故图 5-30 属性栏中的“Method”项选择为“External”方式。

若先确定了计算域，则可选择“Largest Internal”或“Seed Point”方式。一般情况下，包内表面时，选择 Seed Point 可以保证不会丢失面。

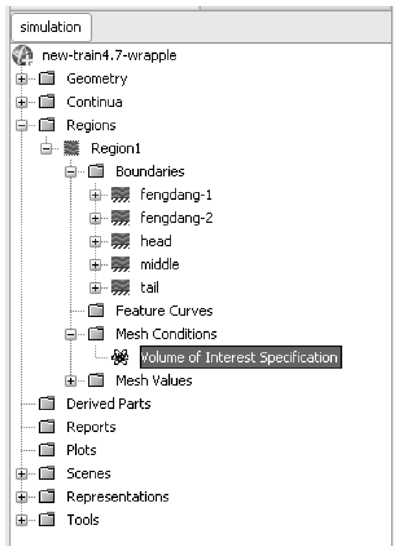


图 5-29　选择包面方式

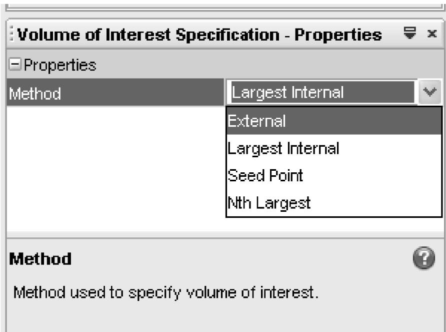


图 5-30　选择“External”方式

如果选择包面方式为“Seed Point”，可右键选择[Regions]>[Region1]>[Mesh Values]>[Wrapper Seed Points]>[New]，建立一个 Seed Point 点，如图 5-31 所示。Seed Point 位置在车与计算域表面之间即可。

包面完成后，网格显示为 578 万左右，如图 5-32 所示。

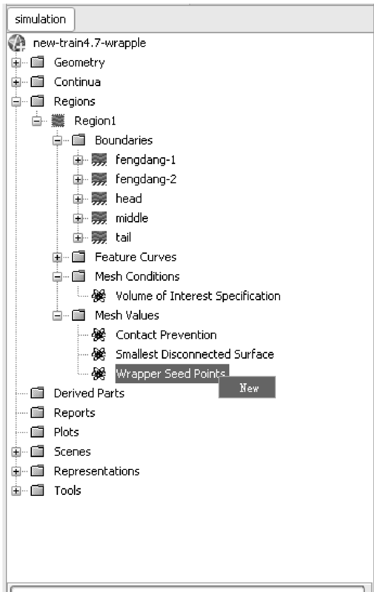


图 5-31　建立 Seed Point

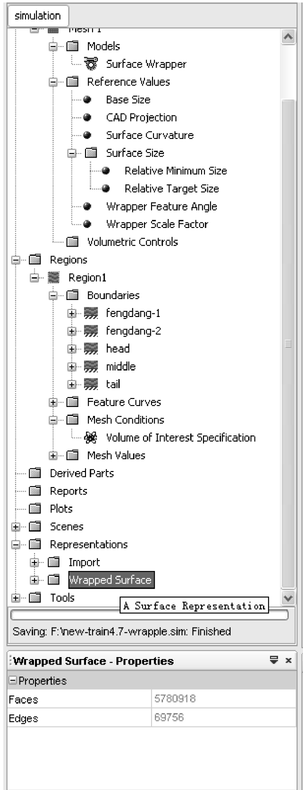


图 5-32　包面网格数量

4. 重构操作

由于重构操作只能针对一套网格进行操作，故需删除掉 import 网格。如图 5-33 所示，右键点击[Representation]>[Import]，选择“Delete”项，删除 import 网格。选择图 5-34 中的“是”按钮，确认操作。

重构操作完成后，[Representations]>[Remeshed Surface]属性栏中的网格数目显示为 145 万左右，如图 5-35 所示。

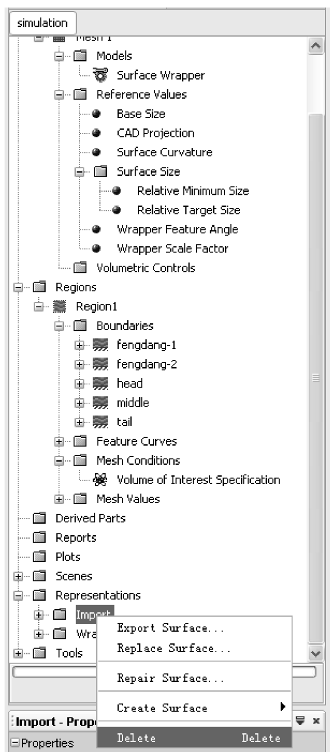


图 5-33　删除 import 网格

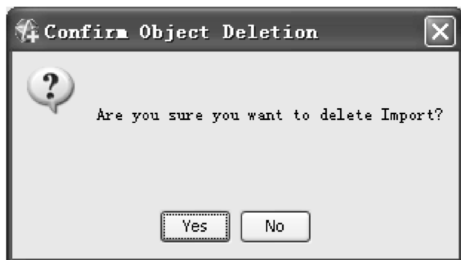


图 5-34　确认删除

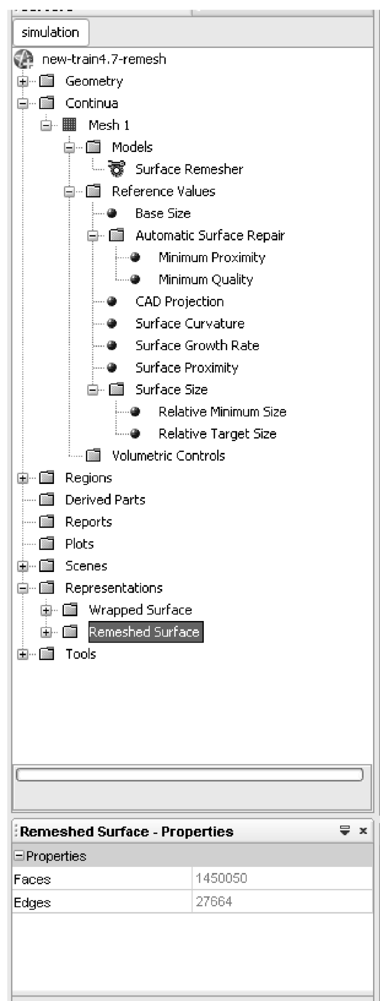


图 5-35　重构网格数量

5. 面网格检查和修复

重构操作可以提升网格质量，但是不能保证所有的网格质量均较优。

如图 5-36 所示，右键点击[Representation]>[Remeshed Surface]>[Repair Surface...]，弹出如图 5-35 所示的对话框。

在图 5-37 中，将 Face Quality 的最小值改为 0.6，将 Face Proximity 的最小值改为 0.3。

面网格检查采用图 5-37 中的标准。

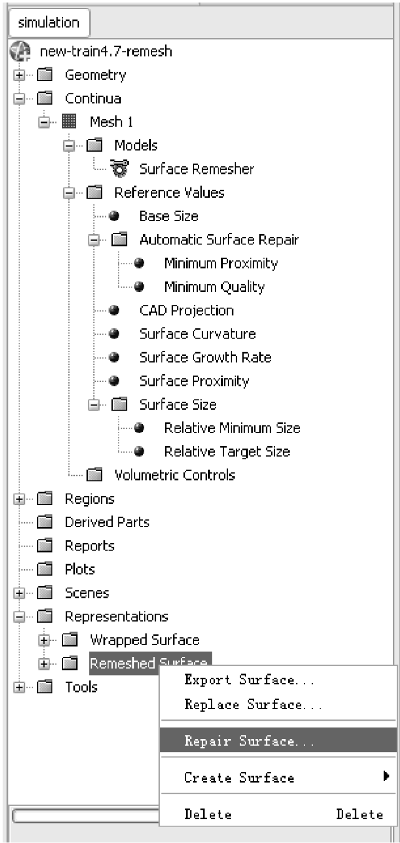


图 5-36 质量较差的网格数量

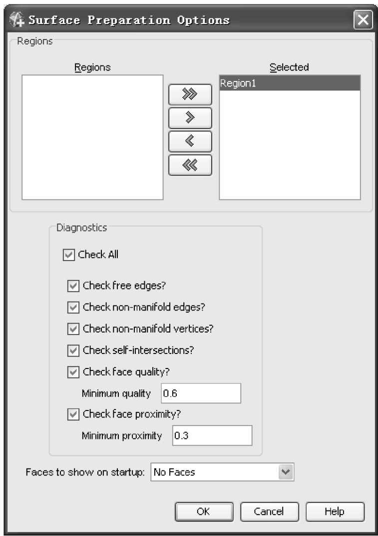


图 5-37 面网格检查的标准

点击“OK”按钮，出现图 5-38 所示的对话框。图 5-38 中显示出各项质量较差的网格数量。由该对话框可以看出：

Pierced Faces：0

Face Quality <0.6 的网格数为 183

Face Proximity <0.3 的网格数为 0

Free Edges：0

Non-manifold Edges：0

Non-manifold Vertices：0

点击图 5-38 下方的▷按钮，视图区出现质量较差的网格。图 5-39 中的白色网格也可以将鼠标停留在视图区，按“→”键，即可实现质量较差网格的切换。

如果点击图 5-36 中的“Reset Diagnostic...”，将出现如图 5-37 所示的对话框，将其中的 Face Quality 的最小值改为 0.5，将 Face Proximity 的最小值改为 0.2，如图 5-40 所示。

此时，检查结果如图 5-41 所示。

总体上看，整车面网格质量较好。此处按图 5-37 中的检查结果进行网格修复。逐个显示质量较差的网格并修复，直至图 5-41 中各项指标显示为 0。

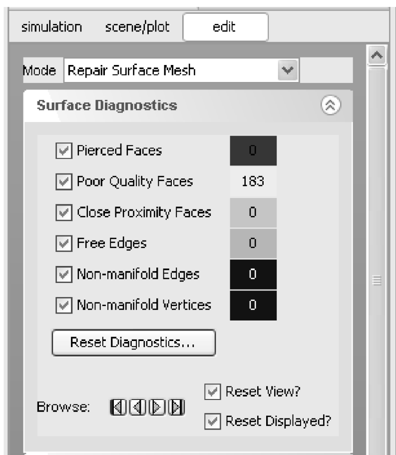


图 5-38　质量较差的网格数量

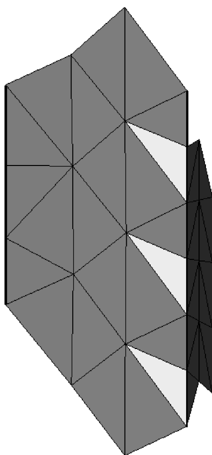


图 5-39　质量较差的网格

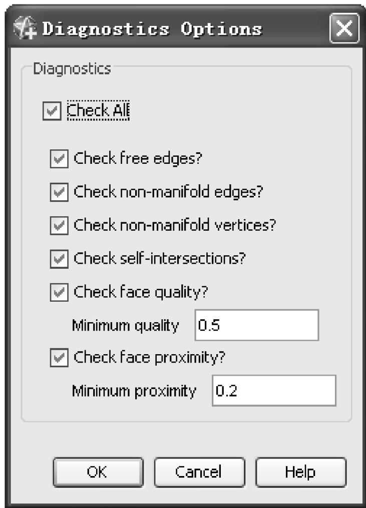


图 5-40　重新检查网格质量

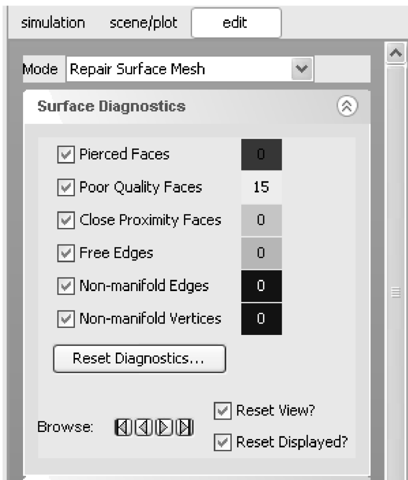


图 5-41　重新检查的结果

5.1.3　体网格生成和检查

1. 选择网格模型和尺寸

选择"Trimmer"和"Prism Layer Mesher"作为体网格生成工具，如图 5-42 所示。

体网格尺寸采用表 5-3 中的数据。

表 5-3　体网格尺寸设置

	Relative Target Size（相对目标尺寸）/m		Relative Minimum Size（相对最小尺寸）/m		Base Size（基本尺寸）/m	Maximum Cell Size（最大网格尺寸）	
	百分比	具体尺寸	百分比	具体尺寸		百分比	具体尺寸
体网格	100%	1	25%	0.25	1	200%	2

边界层网格采用表 5-4 中的数据。

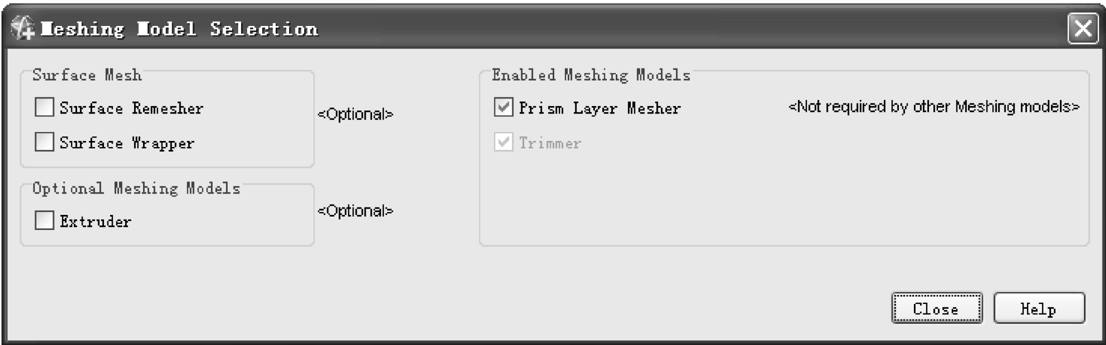


图 5-42　选择“Trimmer”和“Prism Layer Mesher”工具

表 5-4　边界层网格尺寸设置

选　　项	选 项 含 义	数　　值
Number of Prism Layers	层数	6
Prism Layer Streching	增长比	1.5
Prism Layer Thickness	总厚度/m	0.06

2. 设置网格加密区

在列车附近设置三个网格加密区，其中加密区1(图5-43)位于转向架底部区域，加密区2(图5-44)和加密区3(图5-45)在三个方向的区域位置和加密尺寸均逐级扩大，加密区3包围了列车整体。网格加密区的设置方案如表5-5所示。三个方向的位置均用[最小值,最大值]的形式表示。

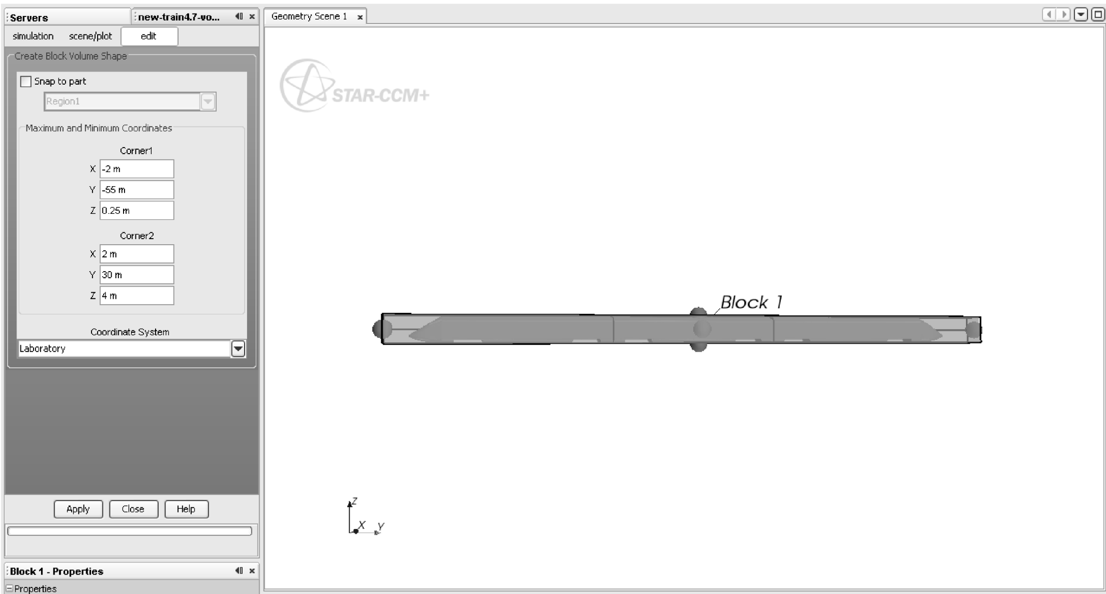


图 5-43　加密区 1

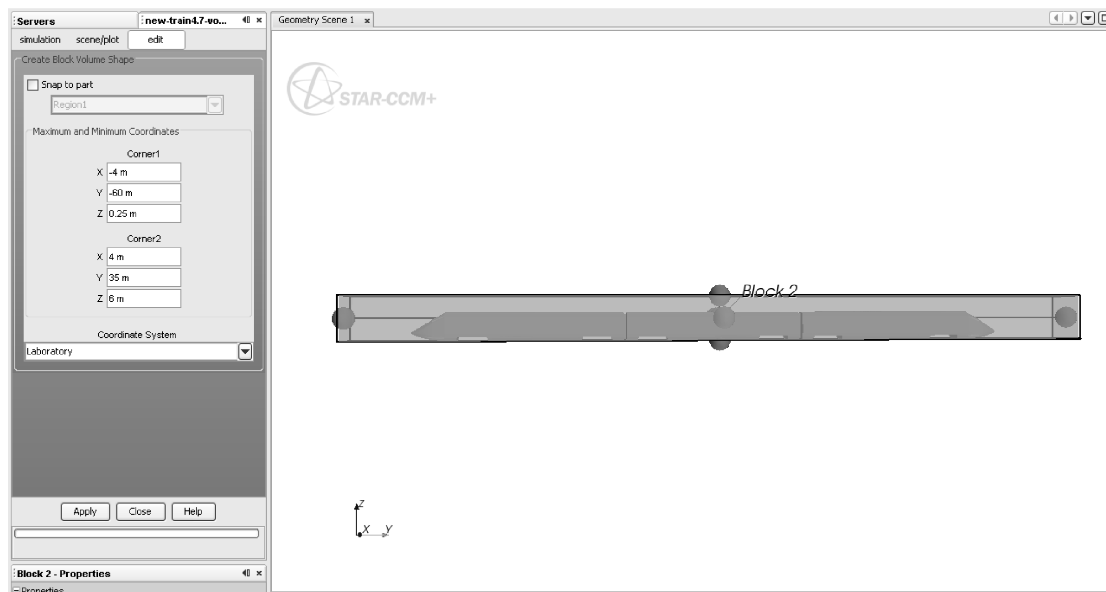


图 5-44　加密区 2

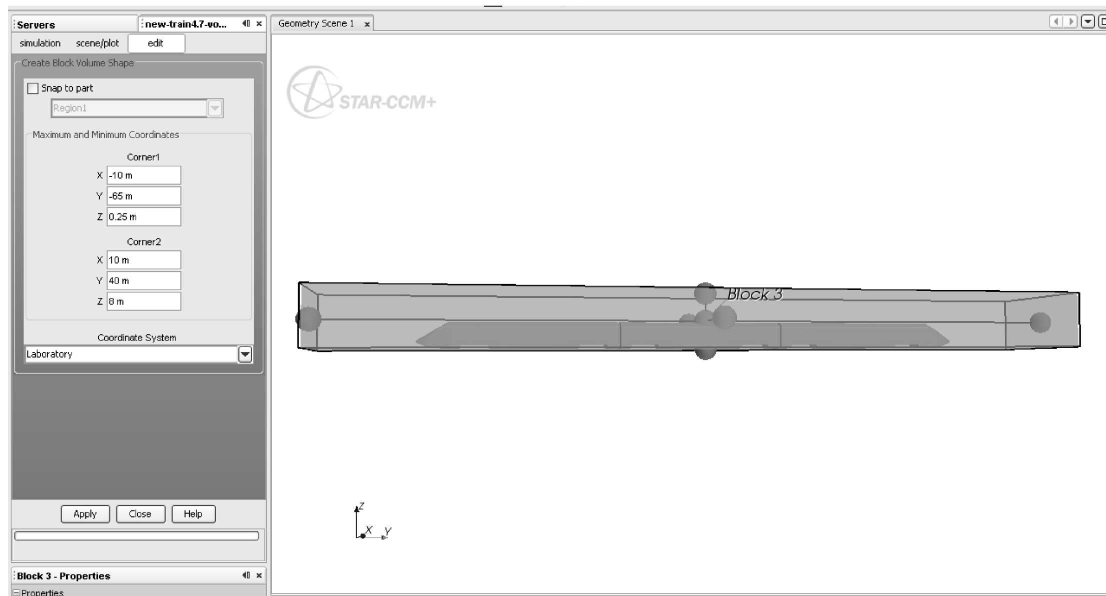


图 5-45　加密区 3

表 5-5　网格加密区的设置

加密区名称	区 域 位 置			加密尺寸/m	
	x 向	*y* 向	*z* 向	百分比	具体尺寸
加密区 1	[−2,2]	[−55,30]	[0. 25,4]	6%	0. 06
加密区 2	[−4,4]	[−60,35]	[0. 25,6]	12%	0. 12
加密区 3	[−10,10]	[−65,40]	[0. 25,8]	24%	0. 24

网格加密区需要预先设定加密区域，右键点击［Tools］>［Volume Shapes］>［New Shape］>［Block］，生成网格加密区1——Block1，如图5-46所示。

网格加密区1的设置如图5-43所示。右键选择［Tools］>［Volume Shapes］>［Block1］>［Copy］，复制Block1，如图5-47所示。

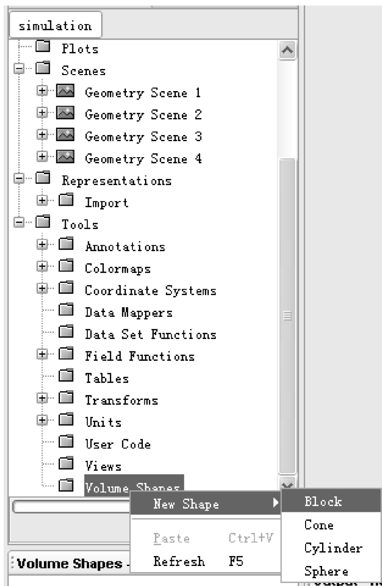


图5-46　新建Block1

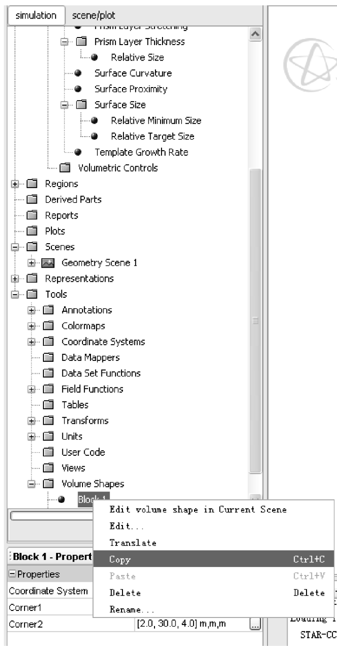


图5-47　复制Block1

右键选择［Tools］>［Volume Shapes］>［Paste］，粘贴Block1，如图5-48所示。

将出现的“Copy of Block 1”项改名为“Block2”。重复以上操作，生成“Block3”，参照图5-47和图5～48进行设置。

连续三次右键点击［Continua］>［Mesh 1］>［Volumetric Controls］>［New］，新建网格加密控制区Volumetric Control 1、Volumetric Control 2和Volumetric Control 3，如图5-49所示。

网格加密区1的设置如图5-50所示。选择Volumetric Control 1属性栏中Shape项最右侧的[...]按钮，在出现的对话框中选择“Block 1”。

按同样方法设置其他网格加密区。同时选择三个网格加密控制区，如图5-51所示。

选择［Continua］>［Mesh 1］>［Volumetric Controls］>［Mesh Conditions］>［Volumetric Control 1］>［Trimmer］，在其属性栏中“Customize isotropic size”项后面打上勾号，如图5-52所示。可以看到，“Trimmer”项下面出现“Mesh Values”项。

展开［Mesh Values］>［Custom Size］>［Relative Size］项，在其属性栏中的“Percentage of Base”项中输入6.0，即加密体网格尺寸为0.06m，如图5-53所示。

加密区2和加密区3也分别按照加密区1和表5-5中的设置方案设置。

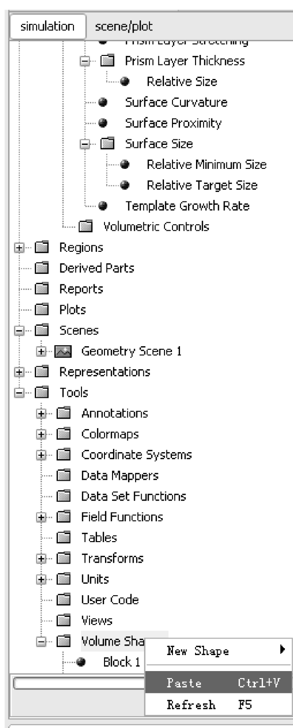


图 5-48　粘贴 Block1

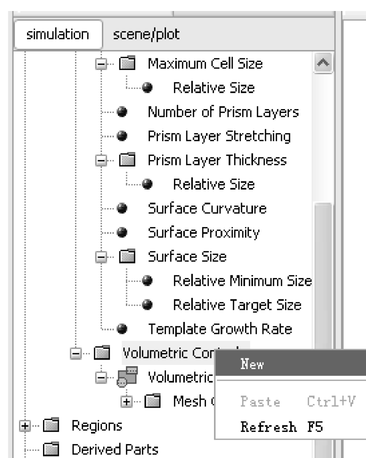


图 5-49　新建网格加密控制区



图 5-50　选择网格加密区



图 5-51　三个网格加密控制区

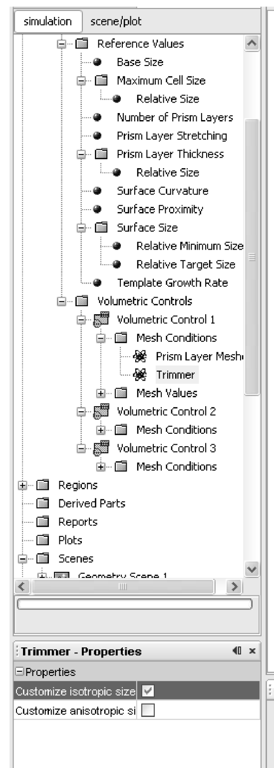


图 5-52　Customize isotropic size 选项

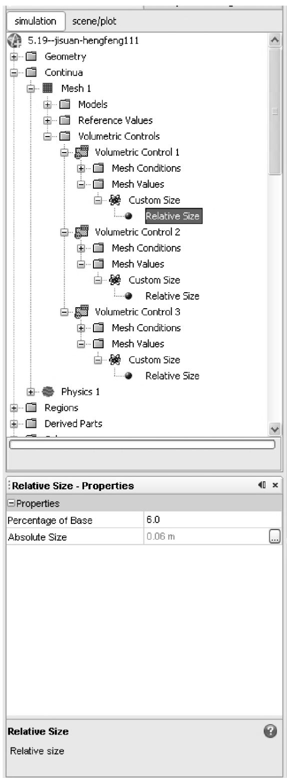


图 5-53　输入加密区 1 的体网格尺寸

3. 计算域的添加

由于软件只能按照一套面网格进行体网格划分，故删除[Representation]>[Wrapped Surface]。针对修复后的 Remesh 网格，添加计算域。右键点击[Representation]>[Remeshed Surface]>[Create Surface]>[Create Block Surface]，如图 5-54 所示。

为方便对计算域各个面进行编辑，选择图 5-55 中的“One Boundary Per Face”项，则所生成的两个计算域可分为六个面单独编辑。

设置好的计算域如图 5-56 所示。

修改计算域各面的名称。如图 5-57 所示，右键点击[Regions]>[Region 1]>[Boundaries]>[Block Faces 4]>[Rename...]。在弹出的对话框中，输入“inlet”，点击“OK”按钮完成设置，如图 5-58 所示。

重复以上操作，将 Block Faces 改名为 side 1，将 Block Faces 2 改名为 outlet，将 Block Faces 3 改名为 ground，将 Block Faces 5 改名为 top，将 Block Faces 6 改名为 side 2。

由于采用了边界层网格工具，软件会默认在各面上均划分边界层。计算域的进口、出口、顶面和两个侧面这五个面只是虚拟的计算域表面，无需划分边界层，而地面则应划分边界层。如图 5-59 所示，选择[Regions]>[Region 1]>[Boundaries]>[side 1]>[Mesh Conditions]>[Customize Prism Mesh]属性栏中“Customize Prism Mesh”的“Disable”项，取消 side 1 边界层的划分。

按照同样方法，取消其他四个面边界层的划分。

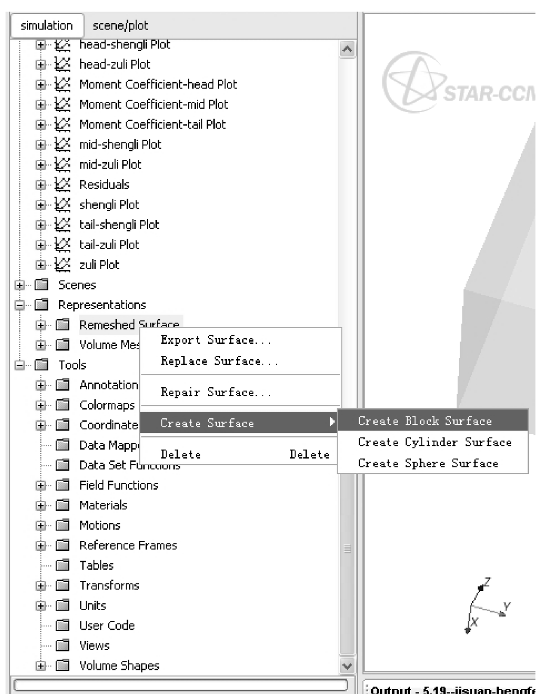


图 5-54　添加计算域

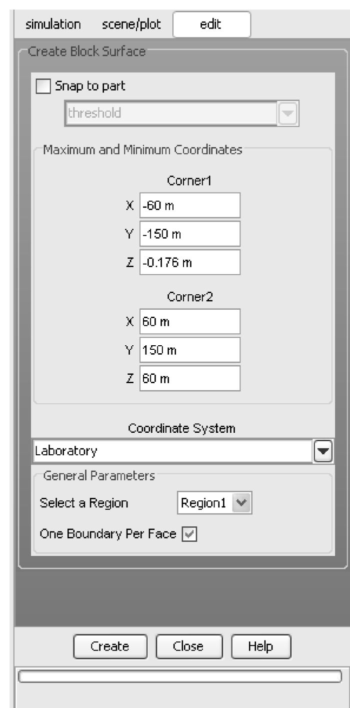


图 5-55　分割计算域表面

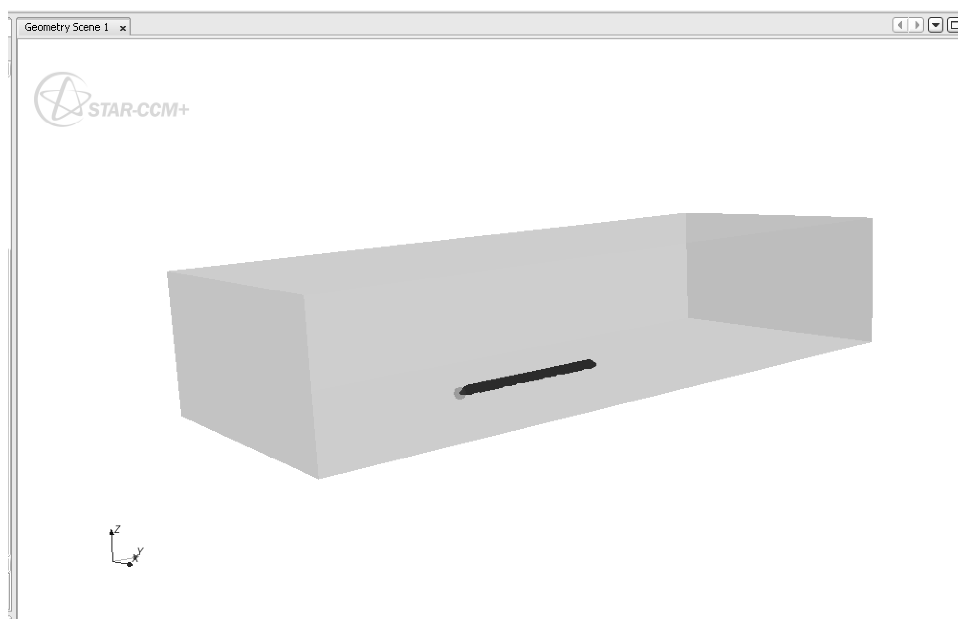


图 5-56　设置好的计算域

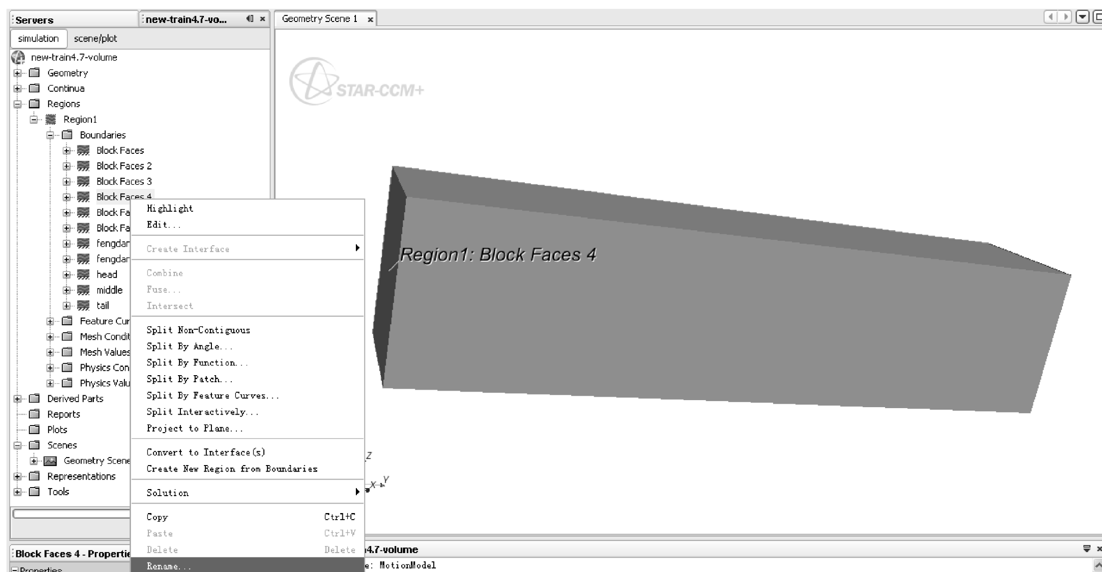


图 5-57 重命名 Block Face 4

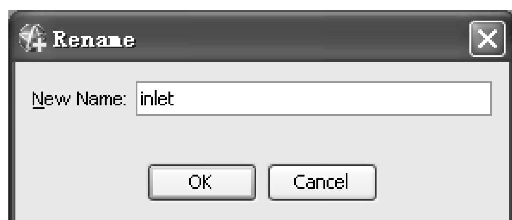


图 5-58 输入新名称

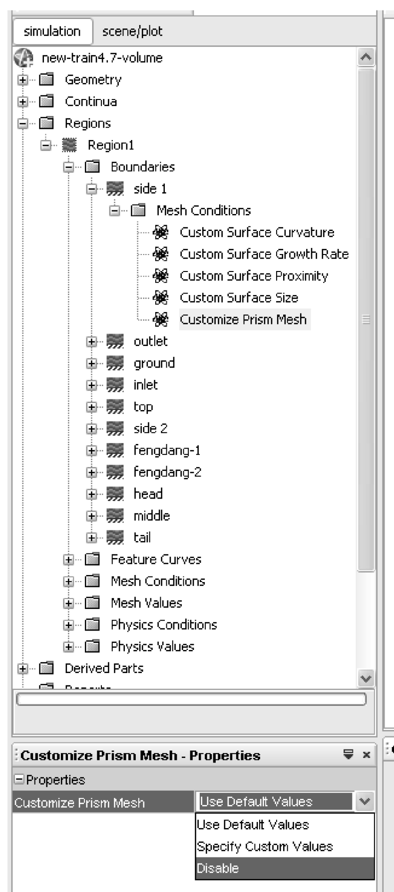


图 5-59 取消边界层划分

4. 体网格的生成和检查

在划分体网格前，选择[Continua]>[Mesh 1]>[Models]>[Trimmer]项属性栏中的“Run Optimizer”项，体网格划分完成后进行网格质量的优化操作，如图 5-60 所示。

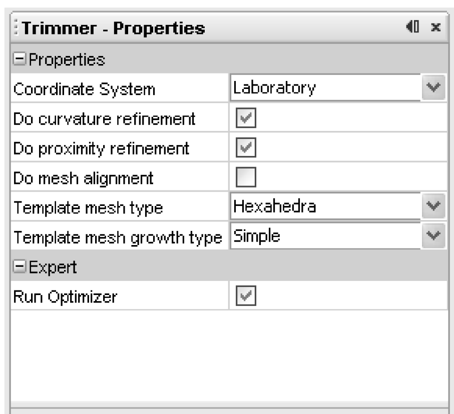


图 5-60　选择网格优化功能

删除包面和操作产生的特征线，如图 5-61 所示。这样使得体网格划分时不受特征线的限制，也就保证了体网格质量。

点击按钮，生成体网格。如图 5-62 所示，选择[Scenes]>[Geometry Scene 1]>[Apply Representation]>[Volume Mesh]，在视图区显示体网格。

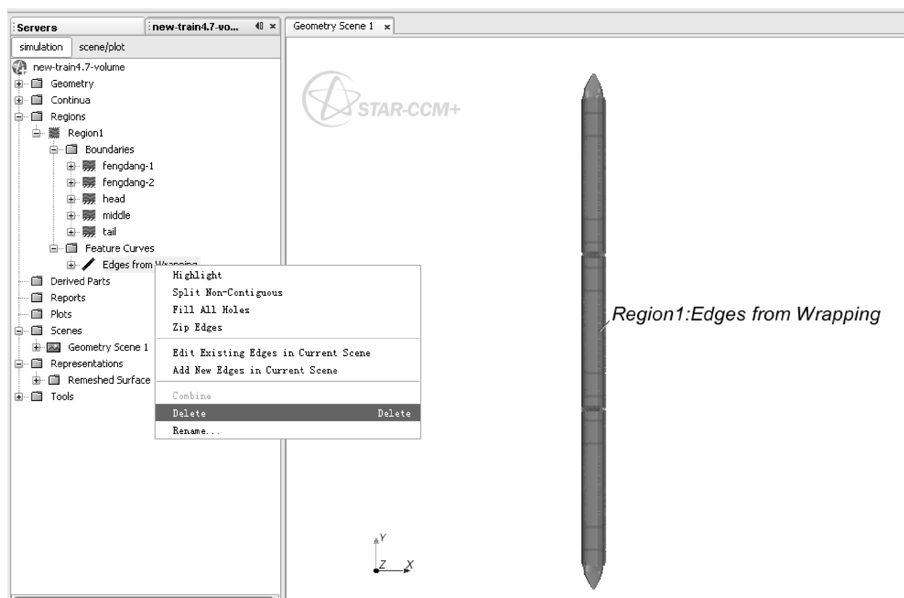


图 5-61　删除特征线

体网格如图 5-63 所示。选择[Representations]>[Volume Mesh]，可以看到属性栏中“Cells”项为 9739299，即为体网格数。

点击菜单项[Mesh]>[Diagnostic]，进行网格质量检查，如图 5-64 所示。在弹出的“Mesh Diagnostics”对话框中(图 5-65)，保持默认选项，点击“OK”按钮，进行检查。

输出窗口中的检查结果如图 5-66 所示。

可以看出，列车表面网格质量和计算域内的体网格均较高，可以进行计算。

也可通过检查 Threshold 值来判别网格质量，可以检查如第 2 章所述的几项指标。如图 5-67 所示，右键选择[Derived Parts]>[New Part]>[Threshold]。

如图 5-68 所示，选择 Threshold 属性栏的“Scalar”项中的变量“Skewness Angle”(斜角,一般要求斜角不大于 90°)。

点击 Threshold 属性栏的“Input Parts”项的按钮...，出现“Select Objects”对话框，如图 5-69 所示。如图 5-69 所示，选择左侧“Selected From”栏中的所有 boundary，点击>按钮，将其放入“Selected”列表框。点击“OK”确定操作完成。

点击“Scalar Range”项右侧的“Query”按钮，检查结果如图 5-70 所示。

选择“Display”项中的“Existing Displayer”选项，如图 5-71 所示。点击“Create”按钮，生成 threshold 检查工具。

点击[Derived parts]>[threshold]属性栏中“Range”项右侧的按钮...，出现“threshold-Range”对话框，如图 5-72 所示。

在“threshold-Range”对话框中，将“min”项值改为 90，即设置检查范围为 90°~150.7°之间，如图 5-73 所示。

threshold 属性栏的 Expert -> Size 项显示为 33，即斜角范围为 90°~150.7°的体网格有 33 个，如图 5-74 所示。由于数量较少，可以不用调整体网格。

复制 threshold 项，新建 threshold 检查项目，如图 5-75 所示。

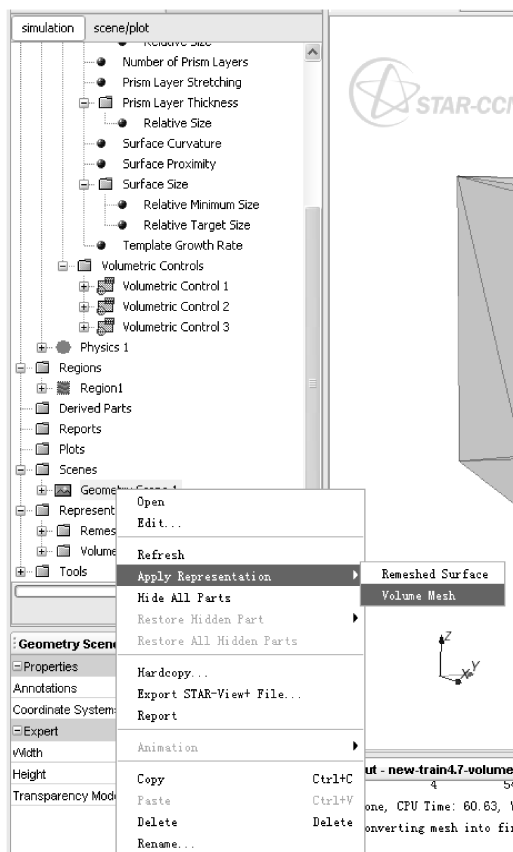


图 5-62　在视图区显示体网格

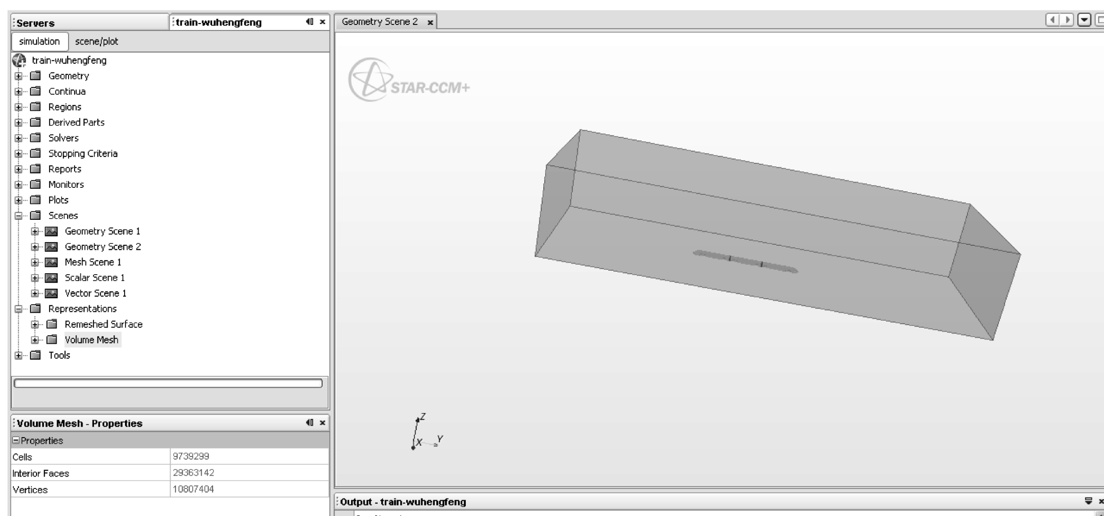


图 5-63　体网格

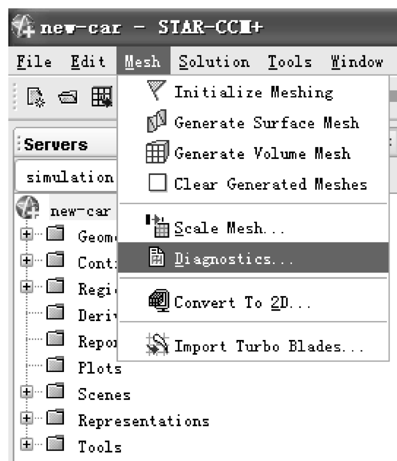


图 5-64　网格质量检查

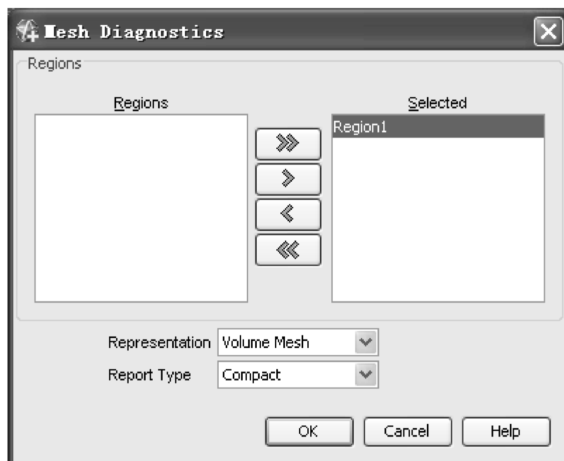


图 5-65　“Mesh Diagnostics”对话框

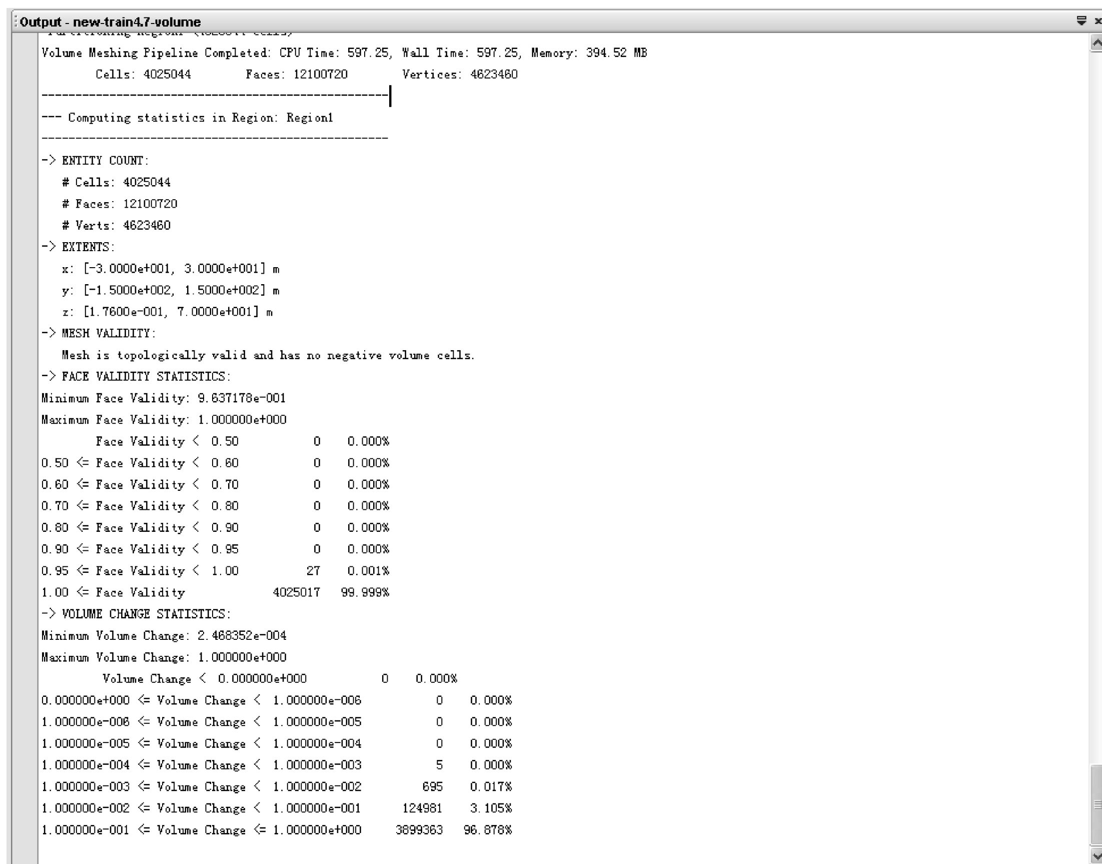


图 5-66　输出窗口中的检查结果

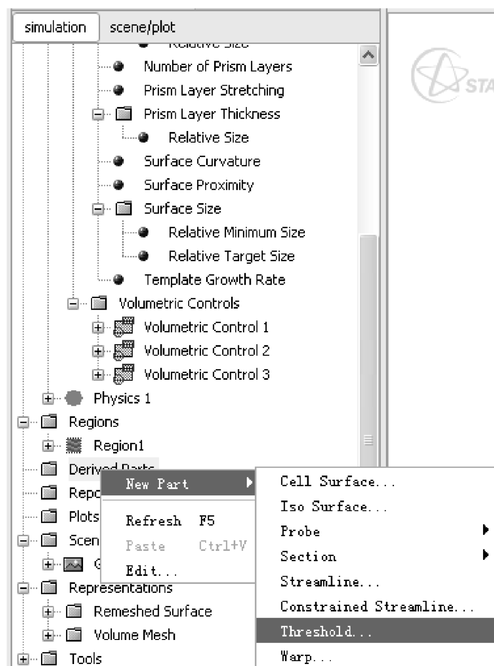


图 5-67　新建 Threshold

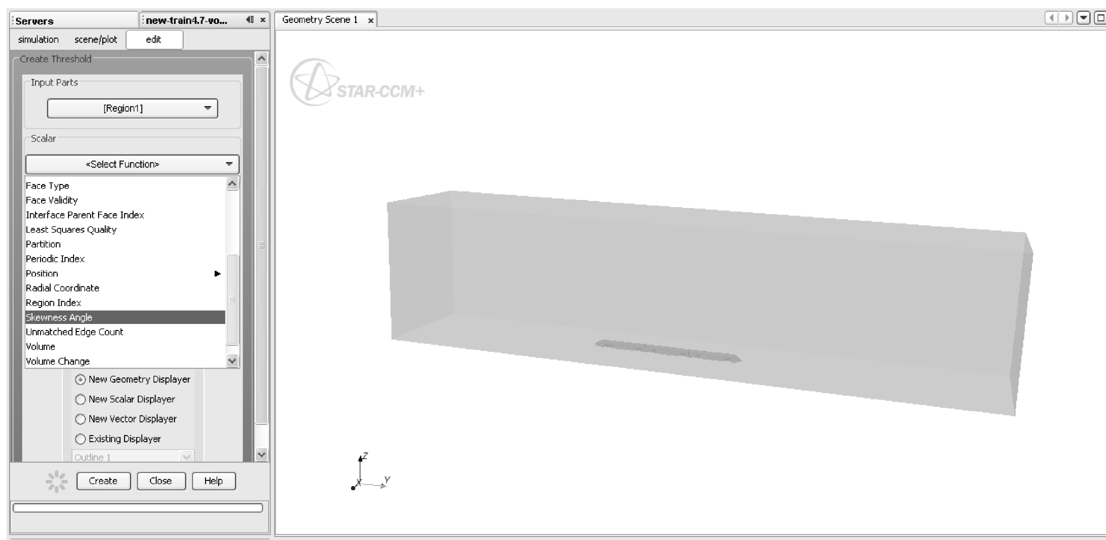


图 5-68　选择“Skewness Angle”

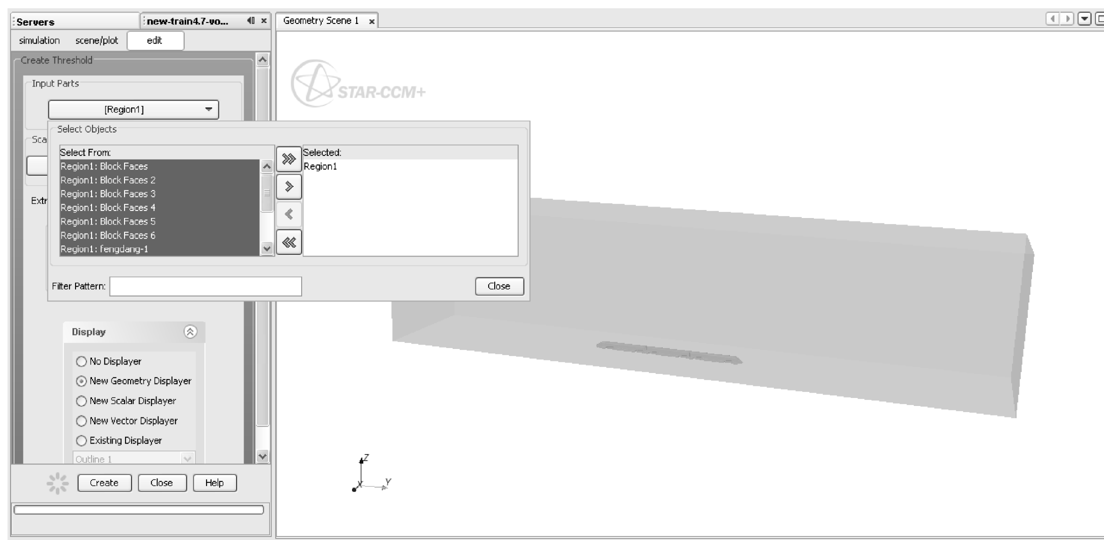


图 5-69　选择 boundary

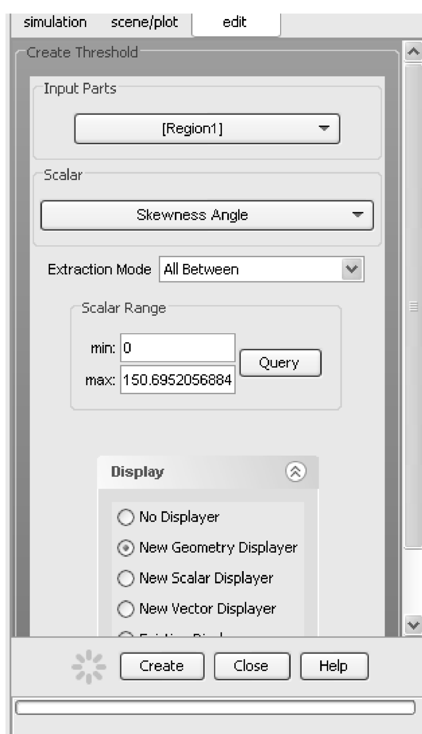


图 5-70　检查斜角的范围

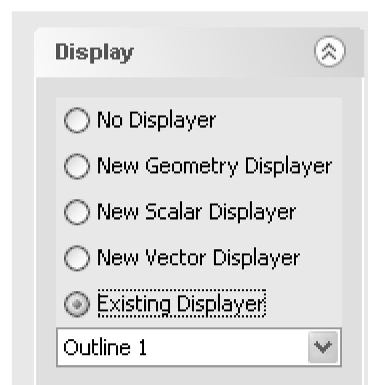


图 5-71　选择“Existing Displayer”

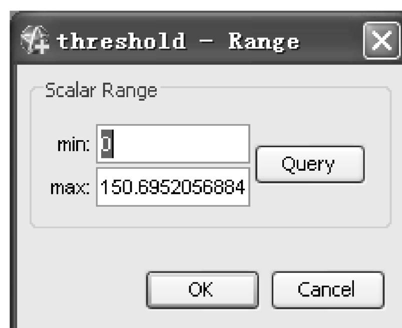


图 5-72　“threshold-Range”对话框

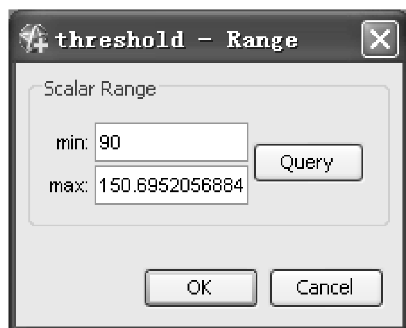


图 5-73 设置检查范围

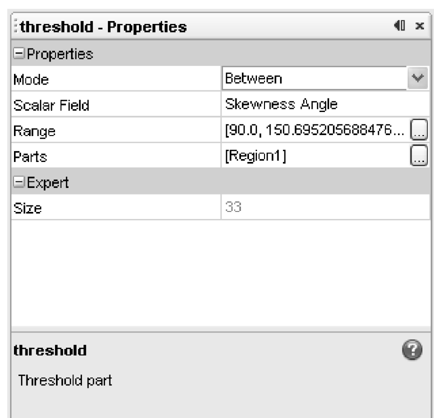


图 5-74 threshold 的检查结果

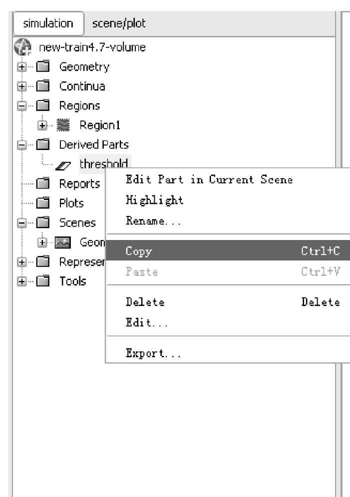


图 5-75 复制 threshold 项

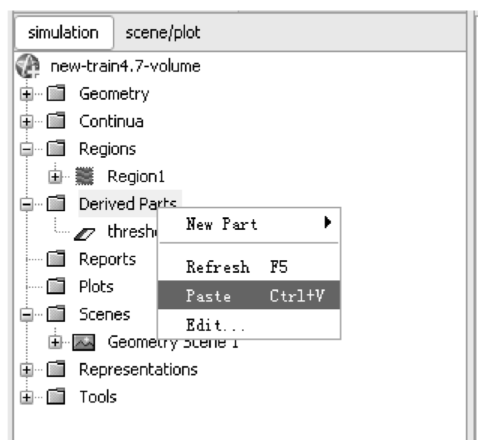


图 5-76 粘贴 threshold 项

右键点击[Derived Parts]>[Paste]，粘贴 threshold 项，如图 5-76 所示。“Derived Parts”项下面出现“Copy of threshold”，选择其属性栏中的“Scalar Field”为“Cell Quality”，如图 5-77 所示。

点击[Derived parts]>[Copy of threshold]属性栏中“Range”项右侧的按钮，出现“threshold-Range”对话框，点击“Query”按钮，如图 5-78 所示。

在“threshold-Range”对话框中，将“max”项值改为 0.00001，即设置检查范围为 0.000001472～0.00001 之间，如图 5-79 所示。

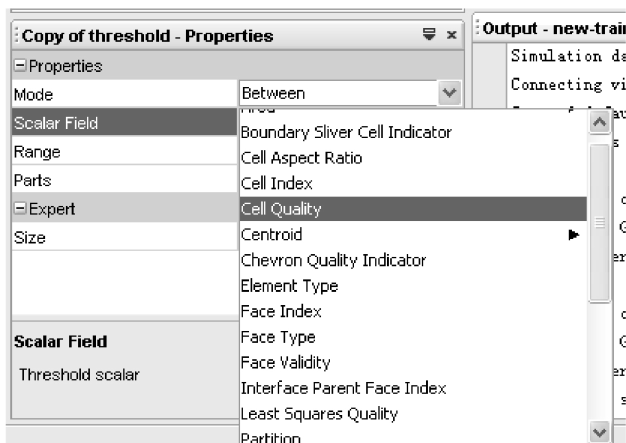


图 5-77 选择 Cell Quality

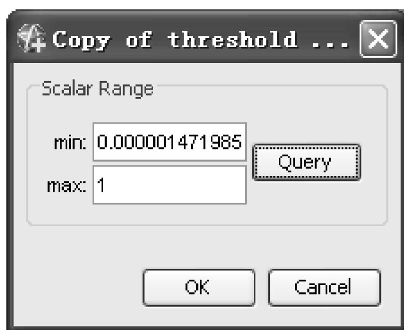


图 5-78　“threshold-Range”对话框

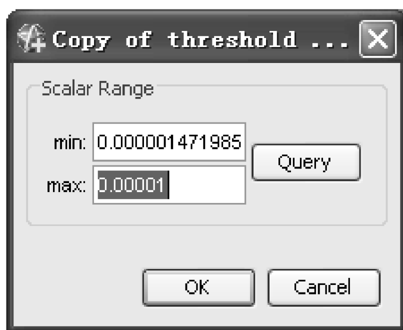


图 5-79　设置检查范围

threshold 属性栏中的“Expert- > Size”项显示为 13，即质量范围为 0.000001472 ~ 0.00001 之间的体网格有 13 个，如图 5-80 所示。由于数量较少，可以不用调整体网格。

按照同样方法可以查看体网格的 Volume Change，即体积变化率不好的网格数目。

开始计算前，可以先移除部分质量不好的网格。如图 5-81 所示，右键选择[Regions] > [Region 1] > [Remove Invalid Cells...]，出现“Remove Invalid Cells”对话框。如图 5-82 所示，设置网格移除标准，将“Minimum Cell Quality”和“Minimum Volume Change”两项的数值均设置为 0.000001。

输出窗口中最后三行显示了网格移除的结果，如图 5-83 所示。可以看出，共移除 4 个质量不好的网格。

被移除的网格并不是被删掉，而是被独立成另一个不用于区域，如图 5-84 所示，该区域一般命名为“Cell deleted from Region1”。

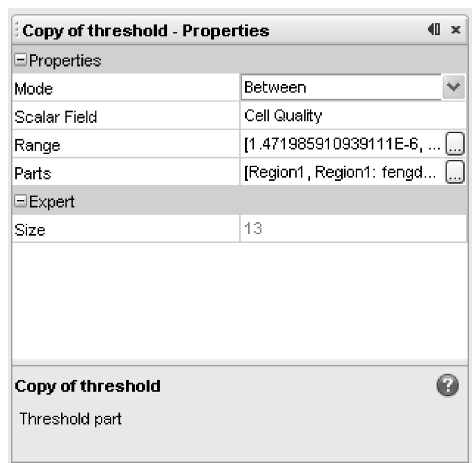


图 5-80　体网格质量的检查结果

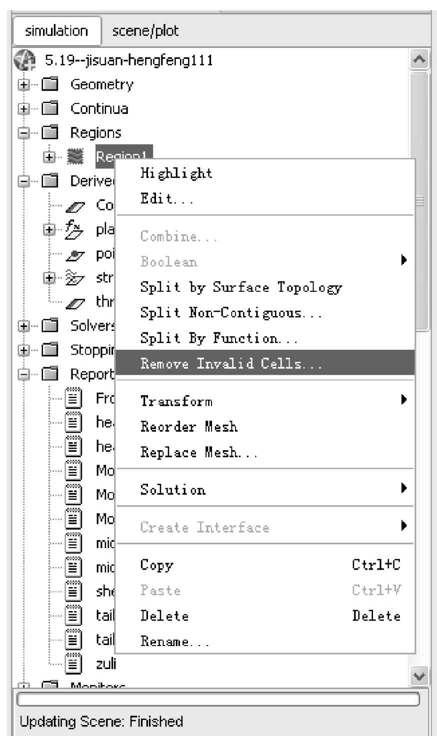


图 5-81　Remove Invalid Cells 对话框

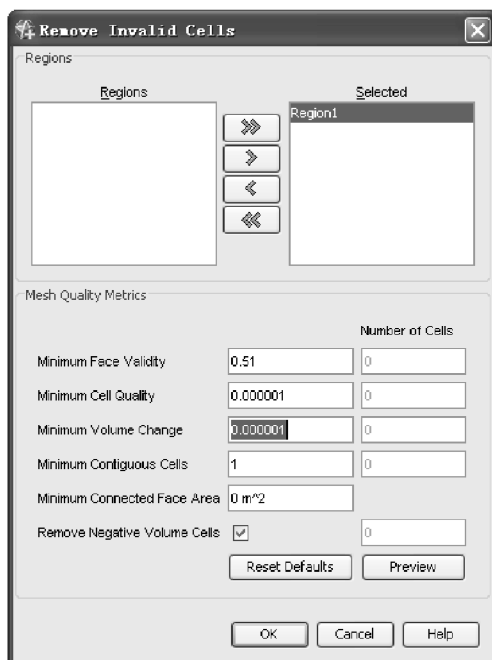


图 5-82　设置网格移除标准

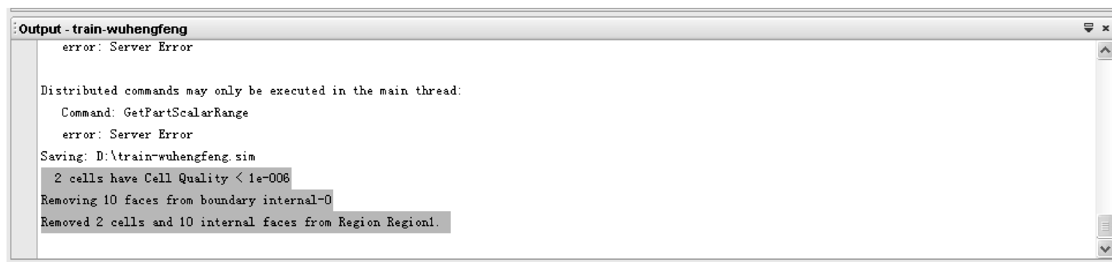


图 5-83　网格移除的结果

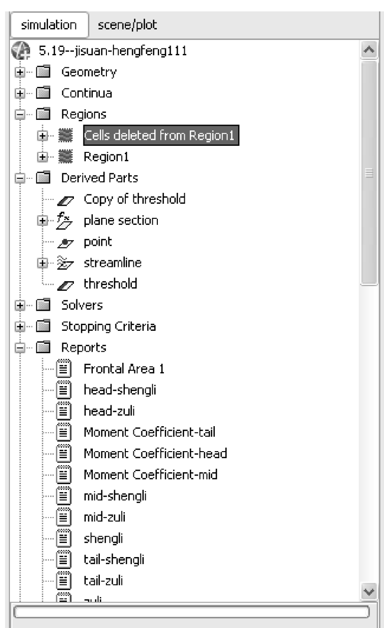


图 5-84　Cell deleted from Region1 区域

5.2　求解

5.2.1　计算条件设置

1. 计算模型

依次选择[Space] > [Three Dimensional]、[Time] > [Steady]、[Material] > [Gas]、[Flow] > [Coupled Flow](列车运行速度较高,空气需视作可压缩气流,可采用耦合式求解方法)、[Equation of State] > [Ideal Gas]、[Viscous Regime] > [Turbulent]及[Turbulence] > [K-Epsilon Turbulence]。同时选择左侧 “Optional Physics Models” 中的 Cell Quality Remediation，选择该项可以在计算时自动纠正极少部分网格上效果不好的计算结果，保证计算的准确度。所选择的模型均被追加到右侧的[Enabled Physics models]中，如图 5-85 所示。

选择树形菜单项[Physics 1] > [Models] > [Gas] > [Air] > [Material Properties] > [Dynamic Viscosity]，在其属性栏 “Method” 项中选择 “Sutherland’s Law”，如图 5-86 所示。

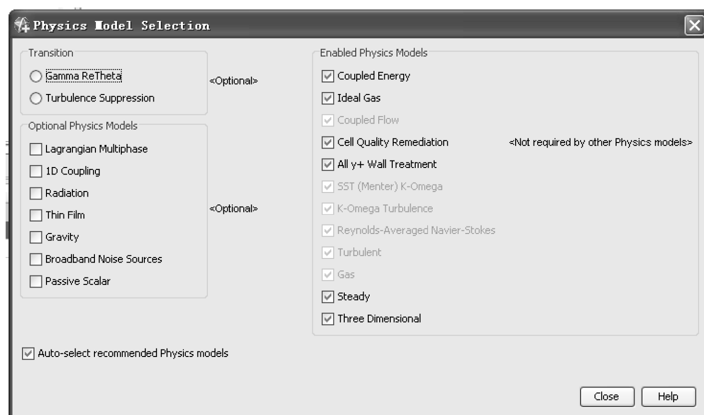


图 5-85　所选择的模型

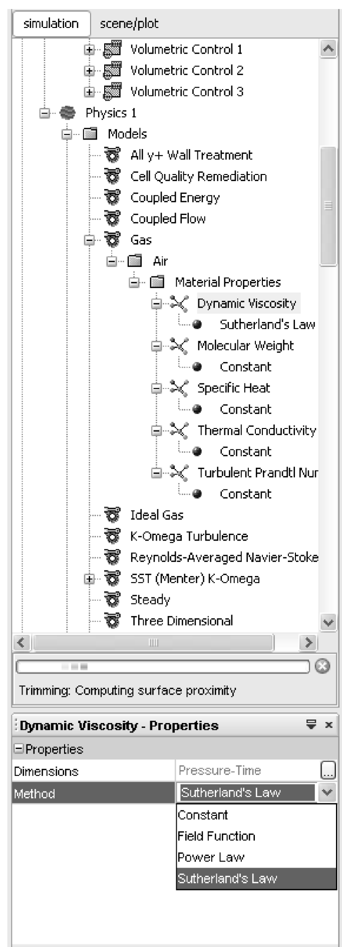


图 5-86　选择 Sutherland’s Law

2. 入口边界条件

入口处采用速度入口边界条件，如图5-87所示。选择[Region1]>[Boundaries]>[inlet]属性栏“Type”项中的“Velocity Inlet”项，如图5-88所示。输入入口速度，在[Region1]>[Boundaries]>[inlet]>[Physics Values]>[Velocity Magnitude]>[Constant]属性栏“Value”项中输入97.2m/s。

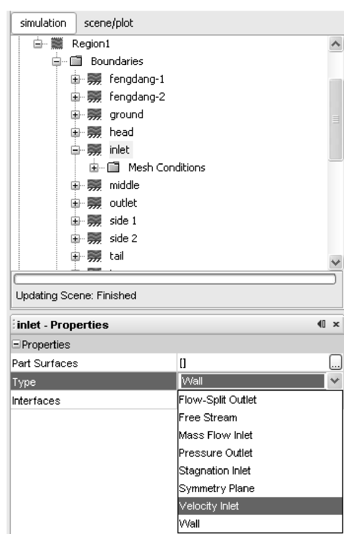


图5-87　入口边界条件设定

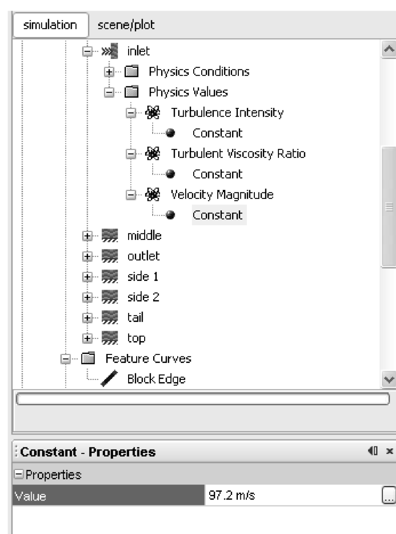


图5-88　输入入口速度

3. 出口边界条件

出口处采用速度压力出口边界条件，如图5-89所示。选择[Region1]>[Boundaries]>[outlet]属性栏“Type”项中的“Pressure outlet”项，如图5-90所示。保持[Region1]>

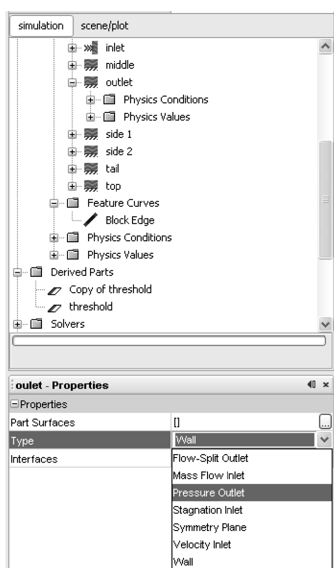


图5-89　出口边界条件设定

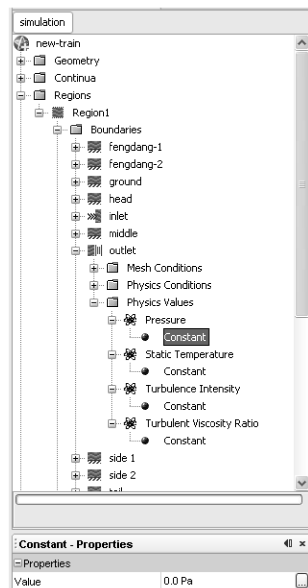


图5-90　出口压力条件设置为0

[Boundaries] > [outlet] > [Physics Conditions] 和 [Region1] > [Boundaries] > [outlet] > [Physics Values] 的设置不变，出口压力设定为大气压力，即相对压力 [Region1] > [Boundaries] > [outlet] > [Physics Values] > [Pressure] > [Constant]设置为 0Pa。

4. 车体壁面边界条件

如图 5-91 所示，选择[Regions] > [Region 1] > [Boundaries] > [head] > [Physics Conditions] > [Shear Stress Specification]属性栏 "Method" 项中的 "No-Slip" 项，将车体壁面设定为无滑移边界条件，以模拟列车表面的摩擦力。

设置好 "head" 边界后，通过复制和粘贴 "head" 的设定，完成其他车体结构，如 middle、tail、fengdang-1、fengdang-2 等边界壁面条件的设定。

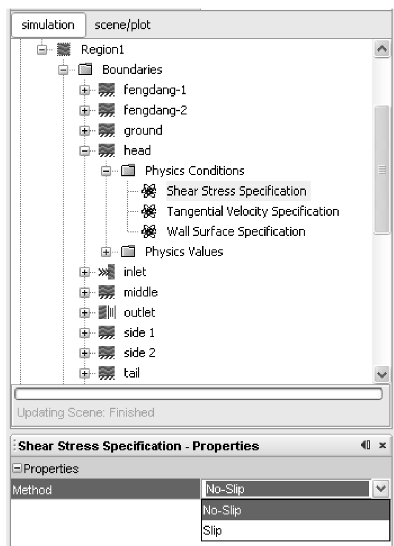


图 5-91　车体表面边界条件设定

5. 地面边界条件

地面设置无滑移边界条件和移动壁面边界条件。

无滑移边界条件模拟地面与气流的摩擦作用，如图 5-92 所示，选择[Regions] > [Region 1] > [Boundaries] > [ground] > [Physics Conditions] > [Shear Stress Specification]，修改属性栏中 "Method" 项为 "No-Slip"。

地面采用移动壁面边界条件，以消除假设条件为来流吹袭、列车静止而引起地面附面层对列车气动性能计算的影响。设置地面移动速度与入口来流速度的大小和方向相同。如图 5-93 所示，选择[Regions] > [Region 1] > [Boundaries] > [ground] > [Physics Conditions] > [Tangential Velocity Specification]属性栏中的 "Method" 项为 "Vector"。修改[Regions] > [Region 1] > [Boundaries] > [ground] > [Physics Values] > [Velocity] > [Constant]，将属性栏中的速度也设置为 97.2m/s，如图 5-94 所示。

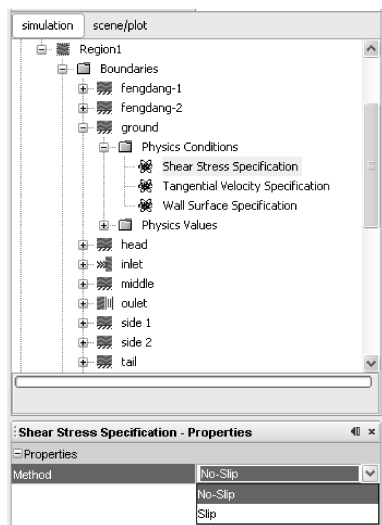


图 5-92　地面无滑移边界条件设定

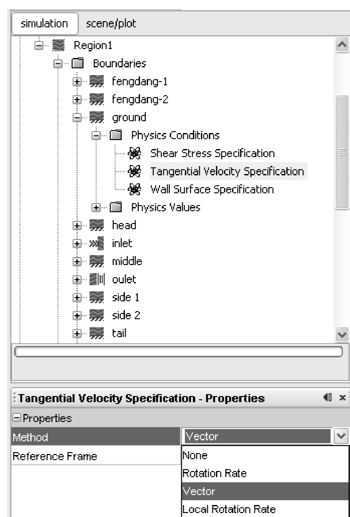


图 5-93　移动壁面边界条件设定

6. 计算域侧面和顶面边界条件

计算域两个侧面和顶面采用滑移边界条件。因为这三个面是虚拟的计算域表面，与壁面边界条件不同，故不用计及摩擦力。

以 side 1 为例进行说明。side 2 和 top 的设定与其相同。选择[Regions]>[Region 1]>[Boundaries]>[side 1]>[Physics Conditions]>[Shear Stress Specification]，修改属性栏中“Method”项为“Slip”，如图 5-95 所示。

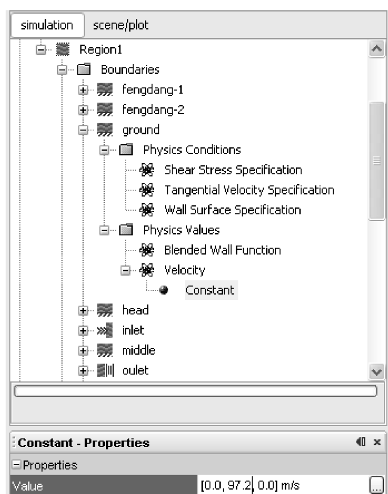


图 5-94 设定地面移动速度

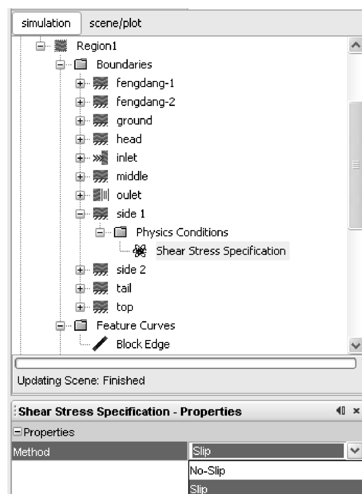


图 5-95 计算域其他表面条件设定

5.2.2 监测曲线和监测点的设定

1. 监测曲线

如图 5-96 所示，右键选择[Reports]>[New Report]>[Force Coefficient]，在 Report 下出现一个 Force Coefficient 1 项，创建阻力系数监测工具。为与其他曲线进行区分，可修改 Force Coefficient 1 的名字为“zuli”。按照第 4 章的方法设置其余项。

右键选择[Reports]>[zuli]>[Create Monitor and Plot from Report]，创建阻力曲线图，如图 5-97 所示。可以看出，树形菜单 Monitor 和 Plots 下出现与 Reports 相同名字的“zuli Monitor”和“zuli Plot”，如图 5-98 所示。

右键选择[Plots]>[zuli Plot]>[Open]，打开阻力曲线图，如图 5-99 所示。视图区的曲线图如图 5-100 所示。

修改[Reports]>[zuli]属性栏中的相关数据，包括 Reference Density(空气密度)、Reference Velocity(列车运行速度)、Reference Area(列车最大横截面积)、Direction(力的方向)以及 Parts(阻力对应的边界)，在“Parts”对话框中将阻力对应的边界从左边移动到右边，如图 5-101 所示。此处以全车阻力曲线设定为例进行说明，头车、尾车、中间车的升力系数、阻力系数均可参考阻力曲线进行设定。

Frontal Area 工具的建立方法如图 5-102 所示，右键选择[Reports]>[New Report]>[Frontal Area]，Reports 栏下出现“Frontal Area 1”项，如图 5-103 所示。

由于本例中来流方向为+Y 方向，在“Frontal Area 1”的属性栏“Normal”项中输入

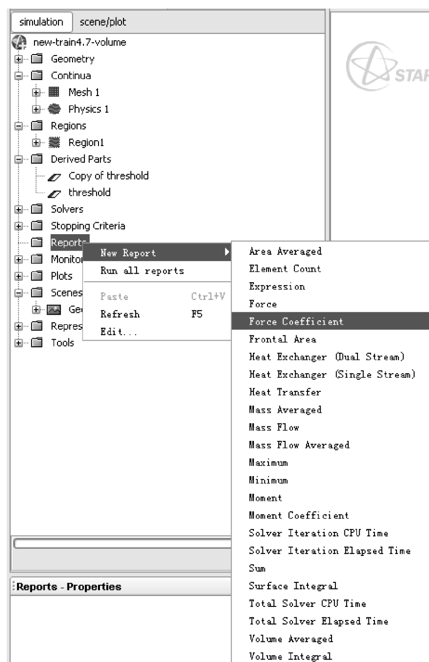


图 5-96　创建阻力系数监测工具

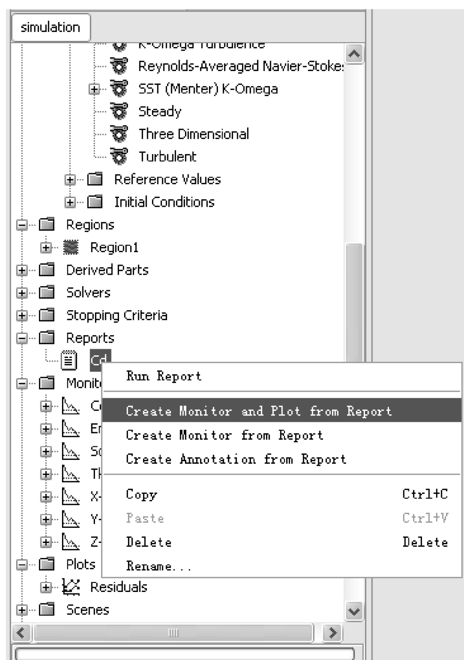


图 5-97　创建阻力曲线图

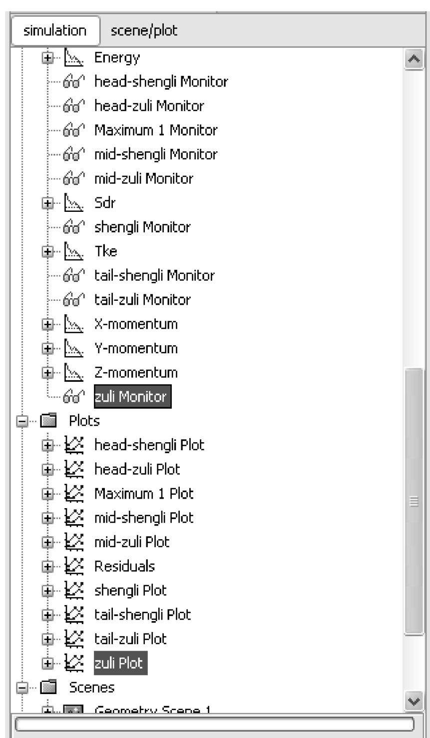


图 5-98　zuli Monitor 和 zuli Plot 选项

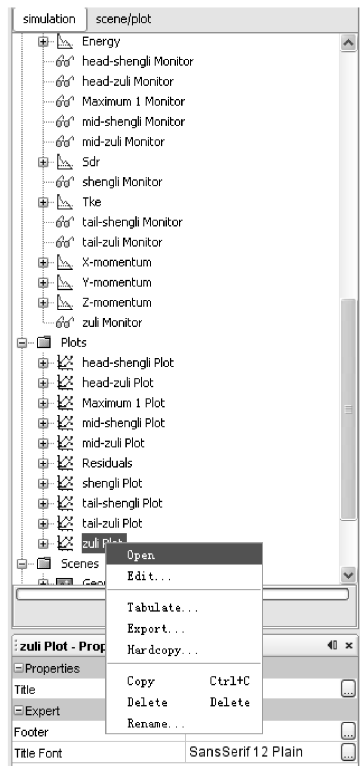


图 5-99　打开 zuli Plot

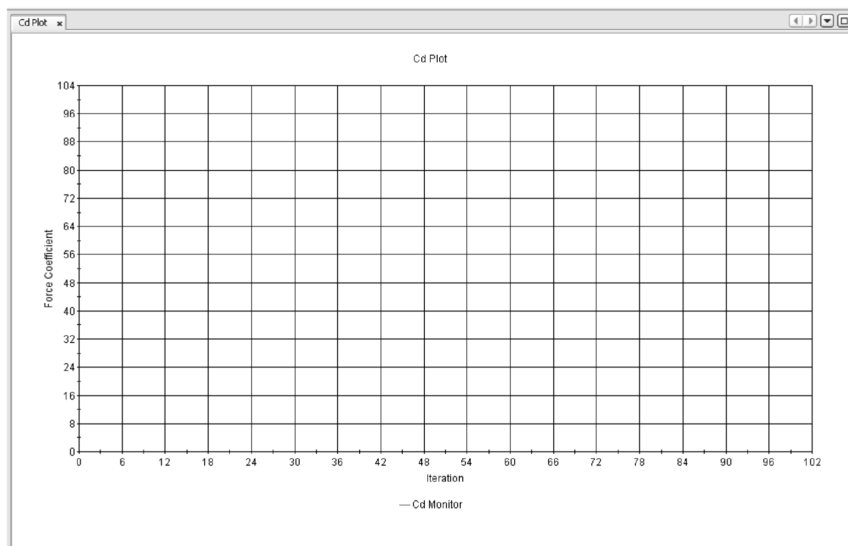


图 5-100 zuli Plot 曲线图

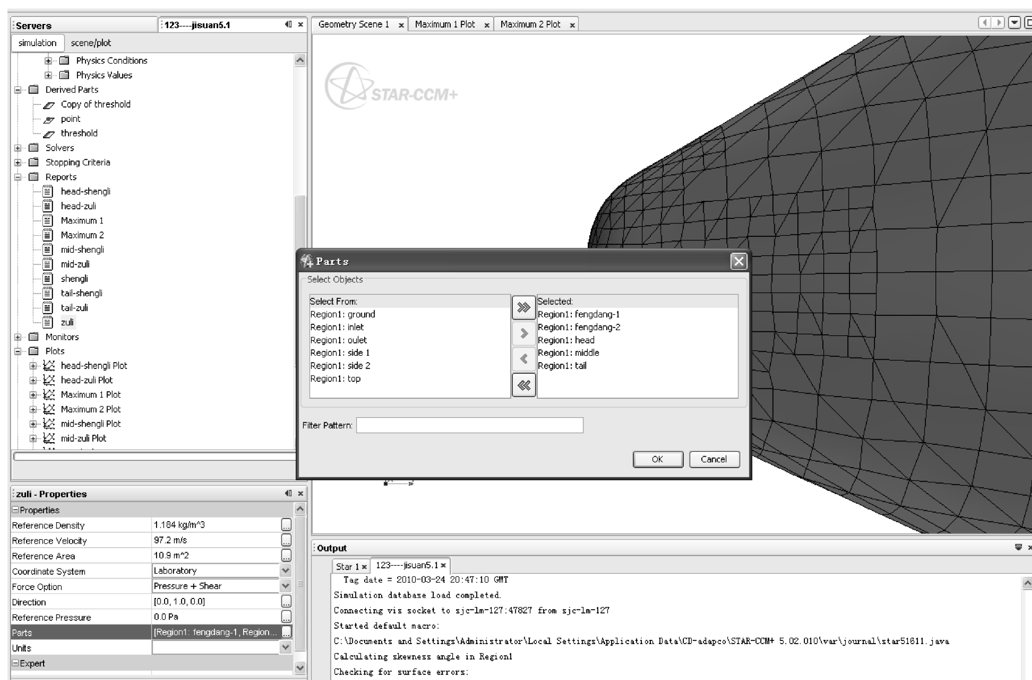


图 5-101 曲线相关参数的设定

“[0.0,1.0,0.0]”，在“Parts”项中输入“Region 1：fengdang-1”、“Region 1：fengdang-2”、“Region 1：head”、“Region 1：middle”和“Region 1：tail”这五个 boundary，选择整车表面形状作为分析目标，如图 5-104 所示。

如图 5-105 所示，右键选择[Reports]>[Frontal Area 1]>[Run Report]，计算车体迎风面积。

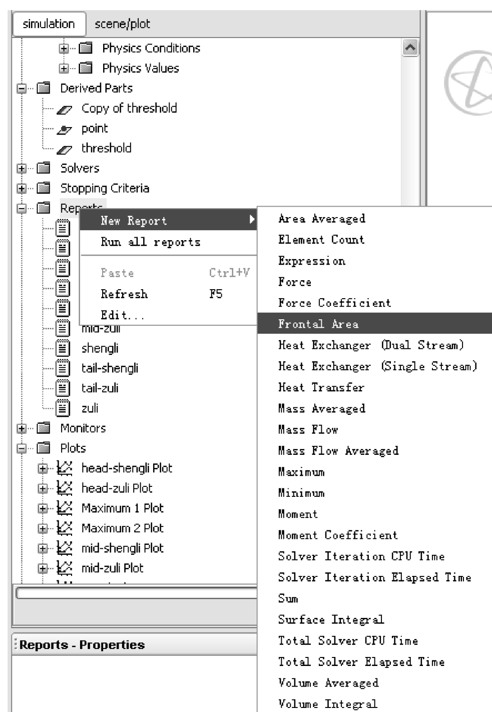


图 5-102　建立 Frontal Area 工具

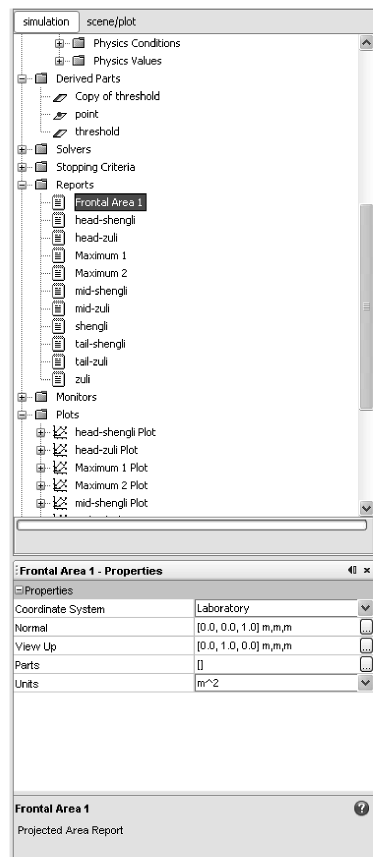


图 5-103　Frontal Area 1 选项

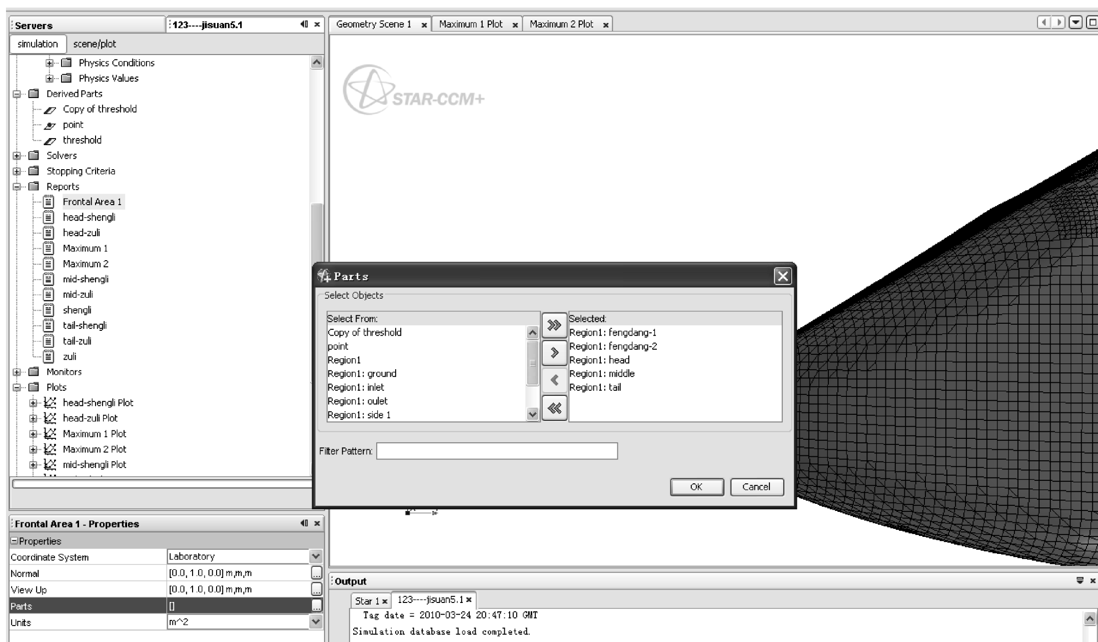


图 5-104　Frontal Area 属性栏设置

输出窗口中显示出车体迎风面积的计算过程和计算结果，如图5-106所示，计算结果为1.090416m^2。

同时参照前述和第4章中讲述的方法，建立整车升力系数监测曲线和头车、中间车、尾车的阻力系数、升力系数监测曲线，如图5-107所示，具体参数详见本章相关计算文件。

2. 压力监测点

在计算中，可以通过监测某一点的压力值，作为计算终止的判定条件。

如图5-108所示，右键选择[Derived Parts] > [New Part] > [Probe] > [Point...]，在出现的“Create Point”窗口中的“Point”项输入点的坐标数值，或根据实际需要通过拖拽调整点的位置。

本例中将监测点建立在头车鼻端处。如图5-109所示，监测点的初始位置在车体底部。

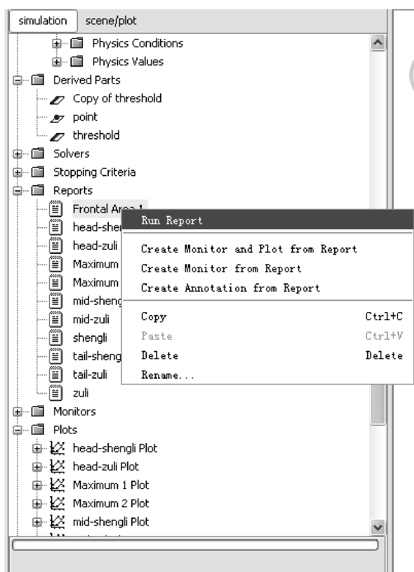


图5-105 计算车体迎风面积

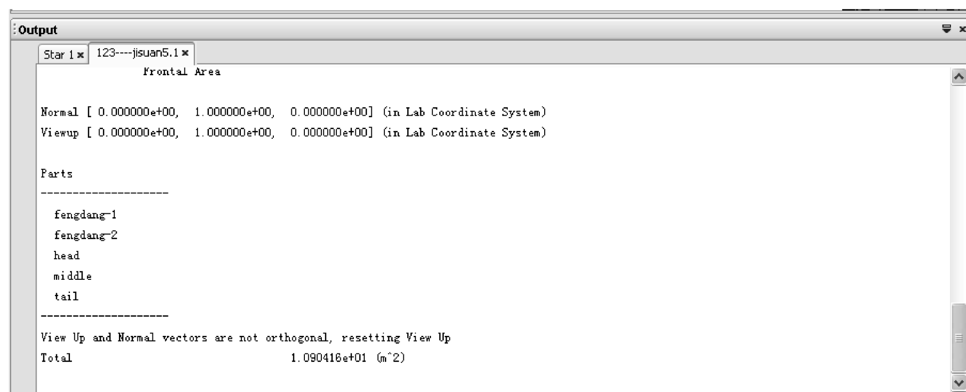


图5-106 车体迎风面积的计算结果

可首先拖动监测点至头车鼻端附近，如图5-110所示。

选择工具栏按钮 > [Standard Views] > [(-Z) bottom]，调整显示视图区中头车区域，如图5-111所示。

冻结Z向，调整X、Y向坐标，监测点变换为二维控制方式(视图区中监测点上仅有X、Y两条坐标线出现)，拖动监测点至图5-112所示的位置。

选择工具栏按钮 > [Standard Views] > [(+X) back]，调整显示视图区中头车区域，如图5-113所示。

冻结X、Y两向，调整Z向坐标，将监测点拖动到鼻端位置，将视图区调整为图5-114所示的形式。

冻结Z向，调整X、Y向坐标，同时点击工具栏按钮，将车体转换为不透明显示方式。拖动监测点到鼻端位置，以监测点部分没入车体内为准，如图5-115所示。

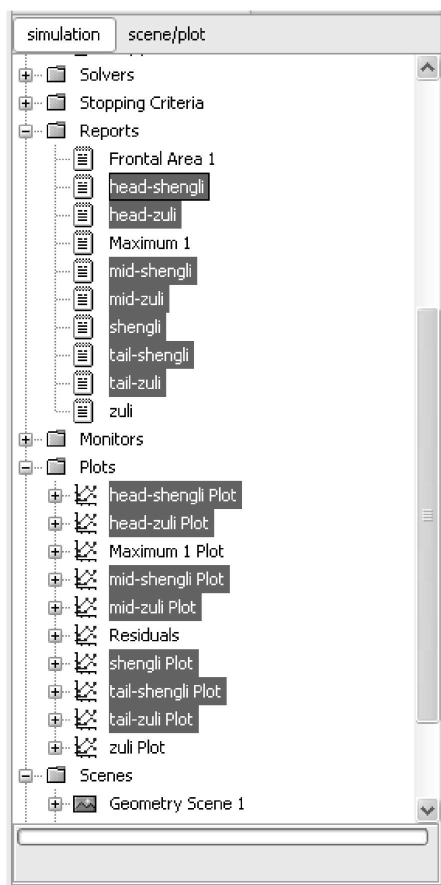


图 5-107　所有监测曲线

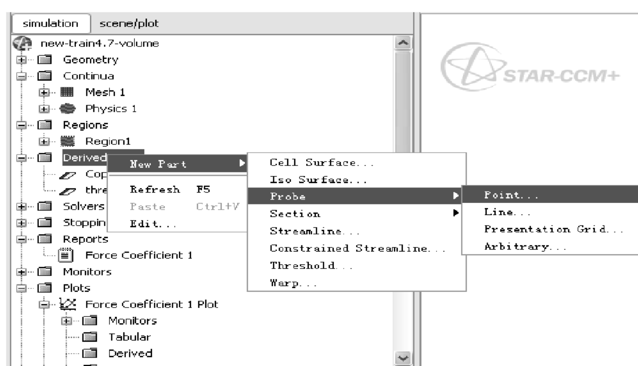


图 5-108　新建监测点

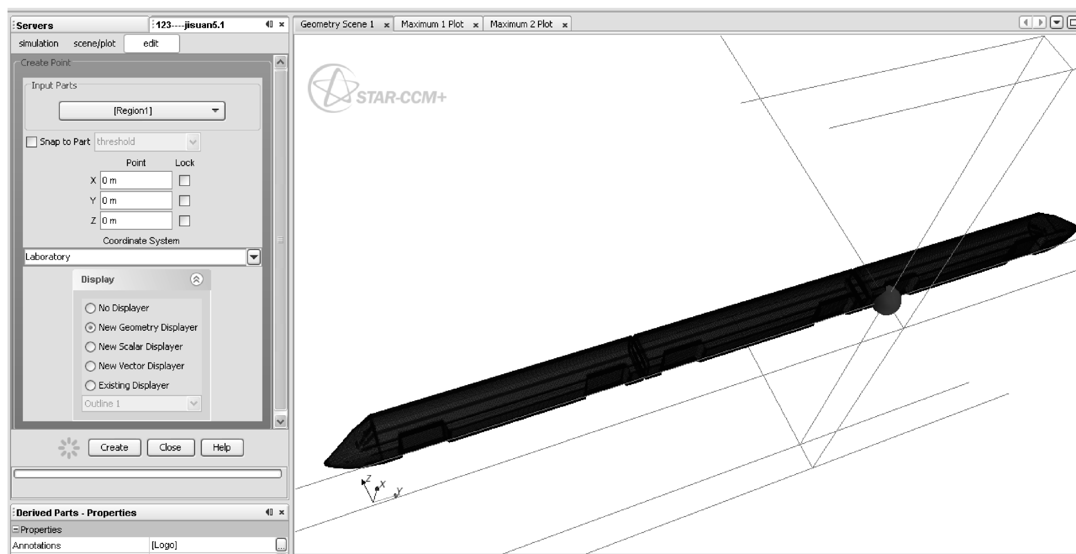


图 5-109　监测点初始位置

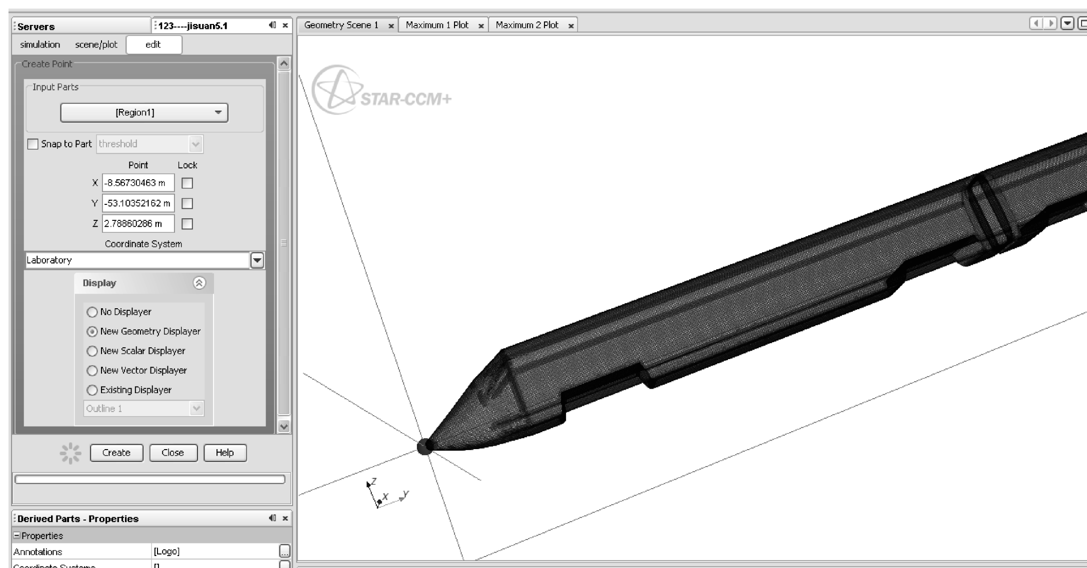


图 5-110　鼻端压力检测点

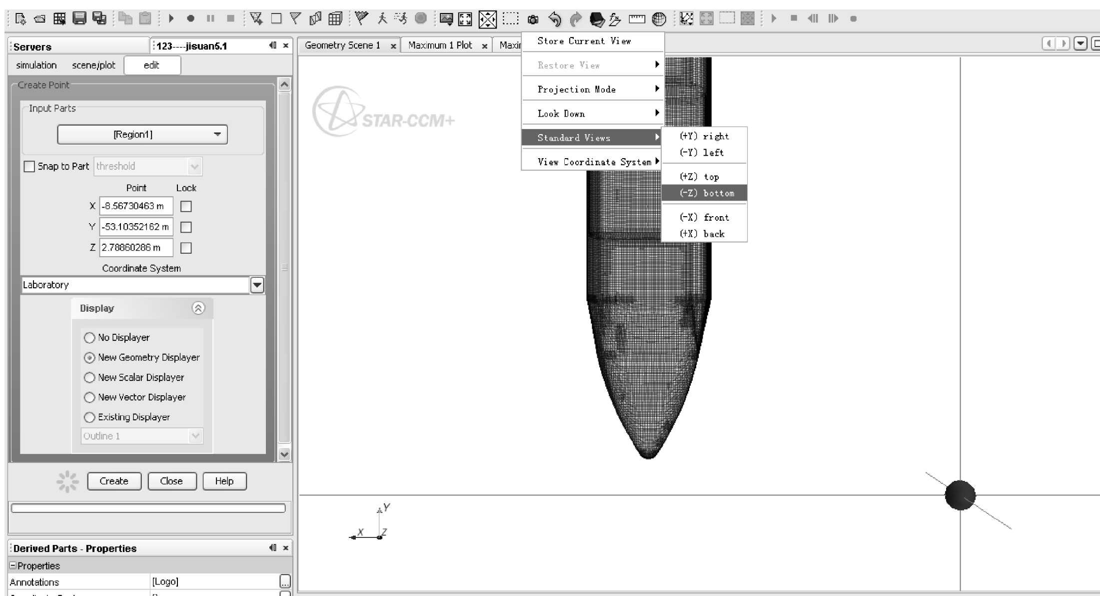


图 5-111　调整为 -Z 向视图

选择 Display 栏中的“New Geometry Displayer”项，点击“Create”按钮生成监测点。点击“Close”按钮确认操作。

监测点生成之后，要设置监测点需要监测的数据，右键选择[Reports]>[New Reports]>[Maximum]。新建压力检测点，如图 5-116 所示。

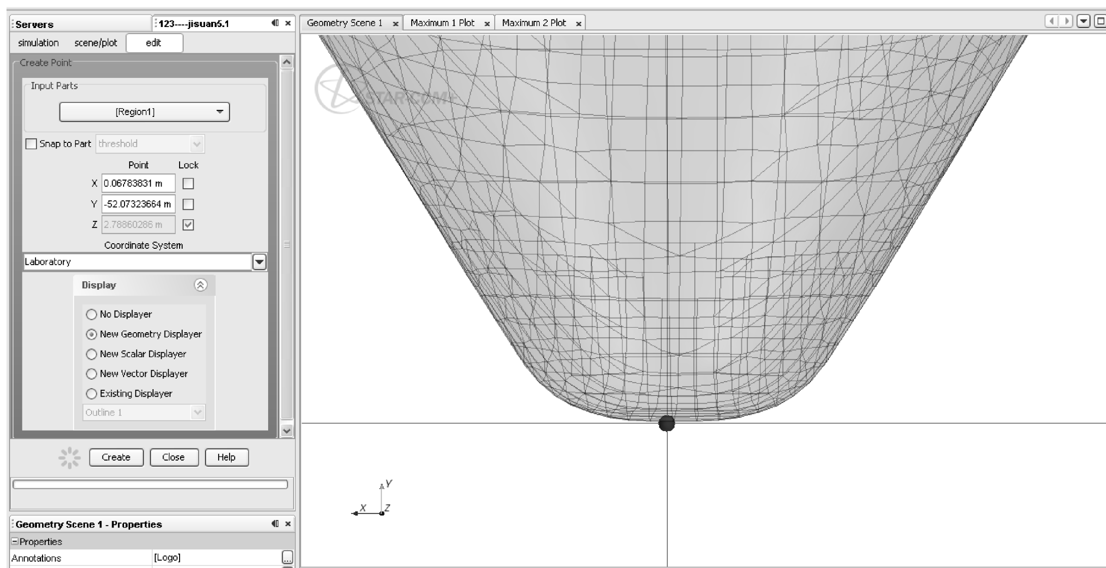


图 5-112　调整 X、Y 向坐标

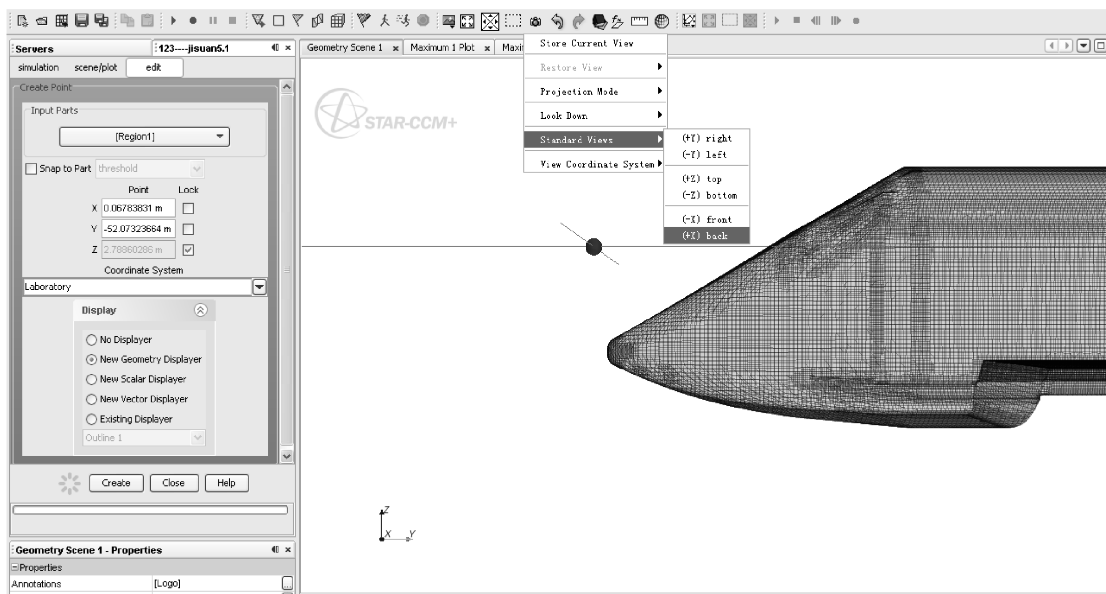


图 5-113　调整为 + X 向视图

选择[Reports] > [Maximum 1]，在属性窗口中 Parts 项的“Select Objects”对话框中选择“point”项，如图 5-117 所示。点击“OK”按钮确认操作。

在属性窗口的“Scalar Field Function”栏的下拉菜单中选择“Pressure”项，如图 5-118 所示。

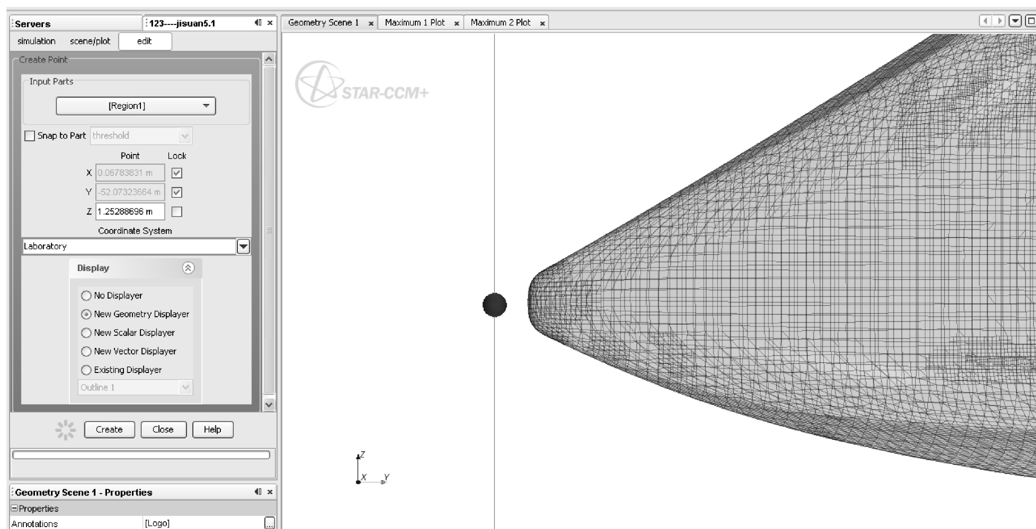


图 5-114 调整为 Z 向坐标

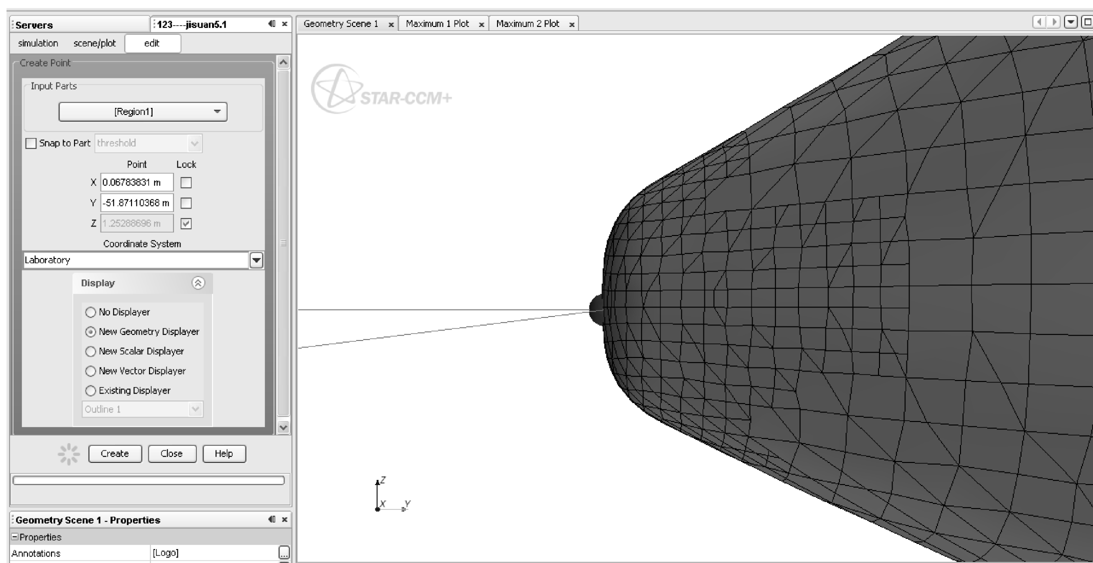


图 5-115 定位监测点

右键点击[Reports] > [Maximum 1] > [Create Monitor and Plot from Report]，在[Plots]下出现[Maximum 1 Plot]。

5.2.3 求解参数设置

1. 自动保存设置

由于列车空气动力学性能计算的步骤较多，需定时保存以防止计算任务因断电或计算机故障等意外情况而没有保存下来。如图 5-119 所示，点击[File] > [Auto Save]，弹出如图 5-120 所示的“Auto Save”对话框。

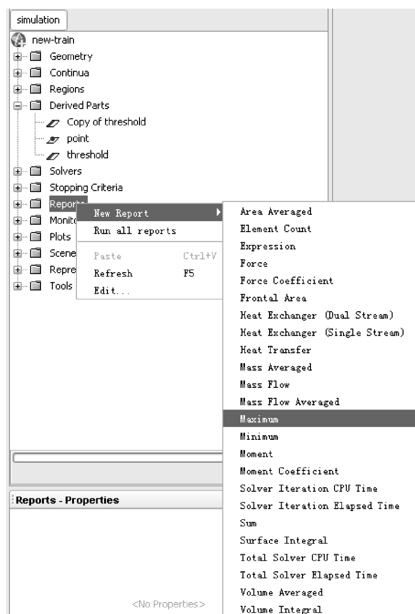


图 5-116　新建压力检测点

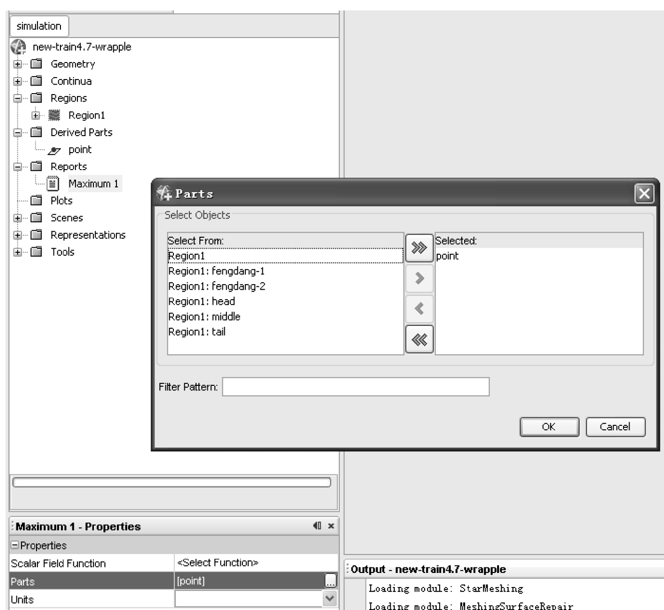


图 5-117　监测点属性设定

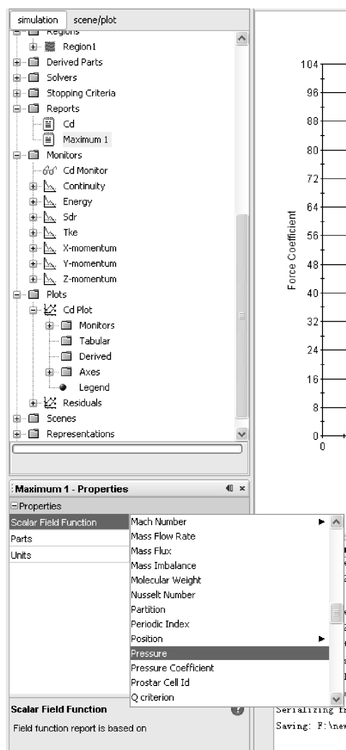


图 5-118　选择 Pressure

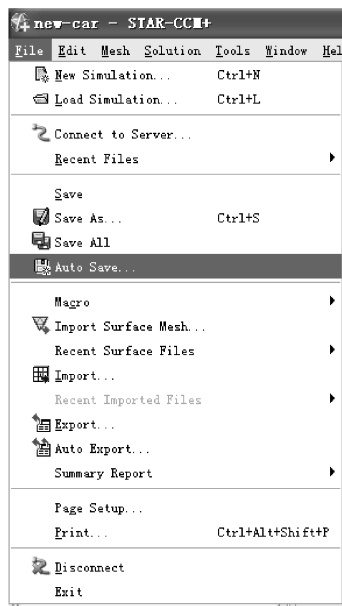


图 5-119　自动保存菜单项

在“Auto Save”对话框中，选择[Trigger Type]>[Iteration]，即按迭代次数的方式保存。选中 Enabled 项的复选框，确认进行自动保存。将[Frequency]项改为 500，确认每隔

500 步保存一次。其他项保持默认设置。设定好的保存设置如图 5-120 所示。

点击“Close”按钮完成设定。

2. 计算迭代步数

如图 5-121 所示，选择[Stopping Criteria]>[Maximum Steps]，在其属性栏中“Maximum Steps”项处设定计算迭代步数为“10000”。一般情况下，根据计算模型需要设定计算步数，本例中由于网格量较大，可以设定较多步，在计算中，根据收敛判据、各监测曲线、“Output”栏的输出数据，判定是否收敛和是否结束计算。

3. Solvers 设定

一般情况下，可压缩流动采用 Coupled Flow 计算方法，而不可压缩流动采用 Segregated Flow。在 Coupled Flow 计算初始时，可以适当调整 CFL 数、松弛因子，保证计算收敛性。如图 5-122 所示，选择[Solvers]>[Coupled Implicit]，将其属性栏中的“Courant Number”项调整为 2.0。Courant Num-

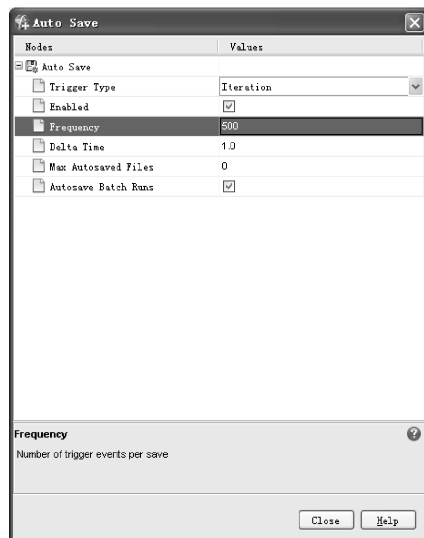


图 5-120 “Auto Save”对话框

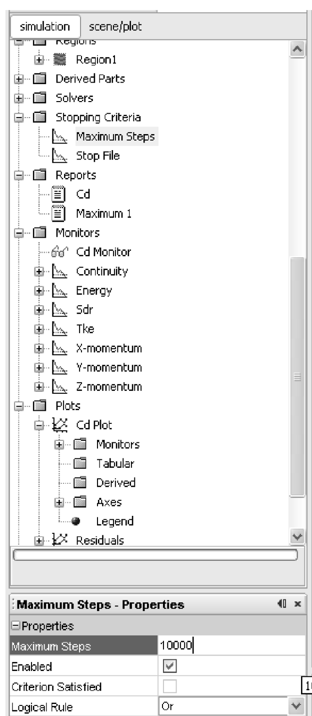


图 5-121 计算步数设定

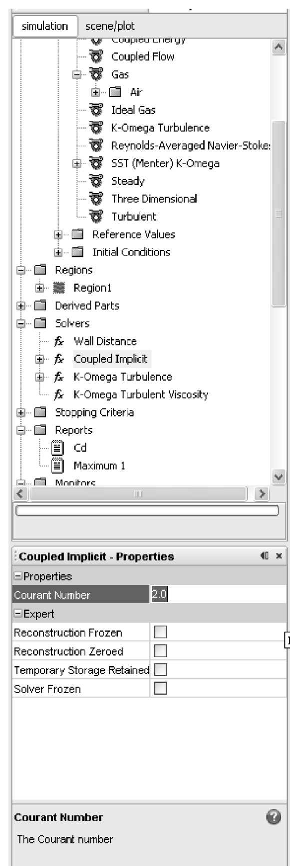


图 5-122 调整酷朗数

ber 即酷朗数，软件默认值为 5.0，适当调低酷朗数会减缓收敛速度，但可以保证收敛精度。

以上设定全部完成后，点击工具栏按钮，开始进行计算。

5.3　后处理

5.3.1　计算结果的统计

以上的设置均针对高速列车明线运行工况下的气动性能计算。高速列车的流场实际是非定常的，其升力、阻力、俯仰力矩系数随迭代步数的增加，不会收敛到唯一的常数。只能计算到气动力系数呈稳定振荡变化时，在稳定变化段取平均值得到平均升力、阻力系数。

1. 整车阻力系数

如图 5-123 所示，整车阻力计算曲线在计算到第 10000 步时仍呈振荡变化状态，但总体上看是收敛的，整车阻力维持在 0.27 ~0.42。

如图 5-124 所示，右键点击[Plots] > [zuli Plot] > [Export...]，导出整车阻力计算结果。

在图 5-125 所示的对话框中，选择“Field Delimiter”栏中的“comma(,)”项，文件类型为“.csv”，输入“zuli”作为文件名，点击“保存”按钮，导出整车阻力计算结果。

打开“zuli.csv”，如图 5-126 所示，整车阻力计算结果按计算步数和计算结果两列保存。

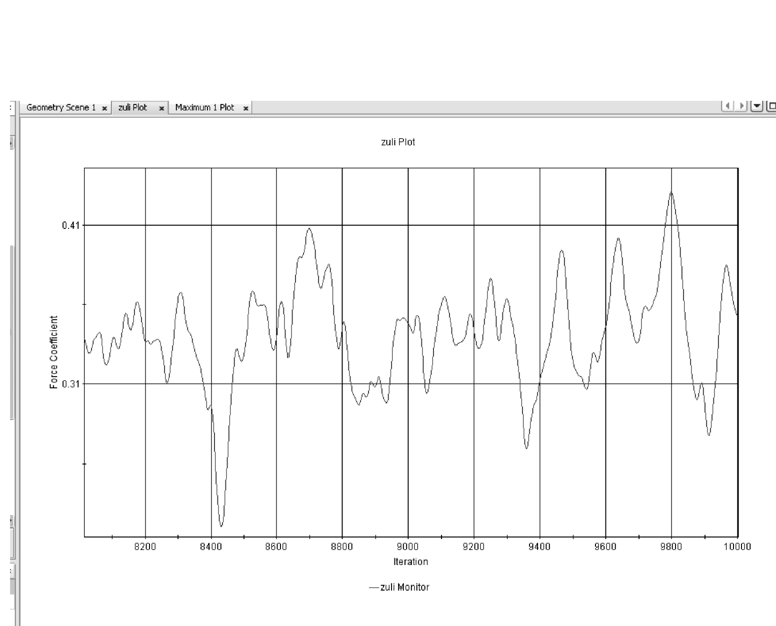


图 5-123　阻力计算曲线

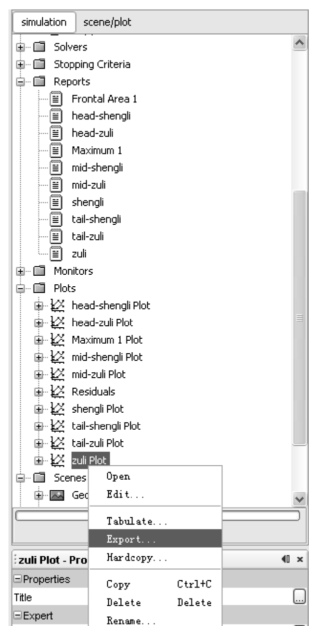


图 5-124　导出整车阻力计算结果



图 5-125　选择导出方式

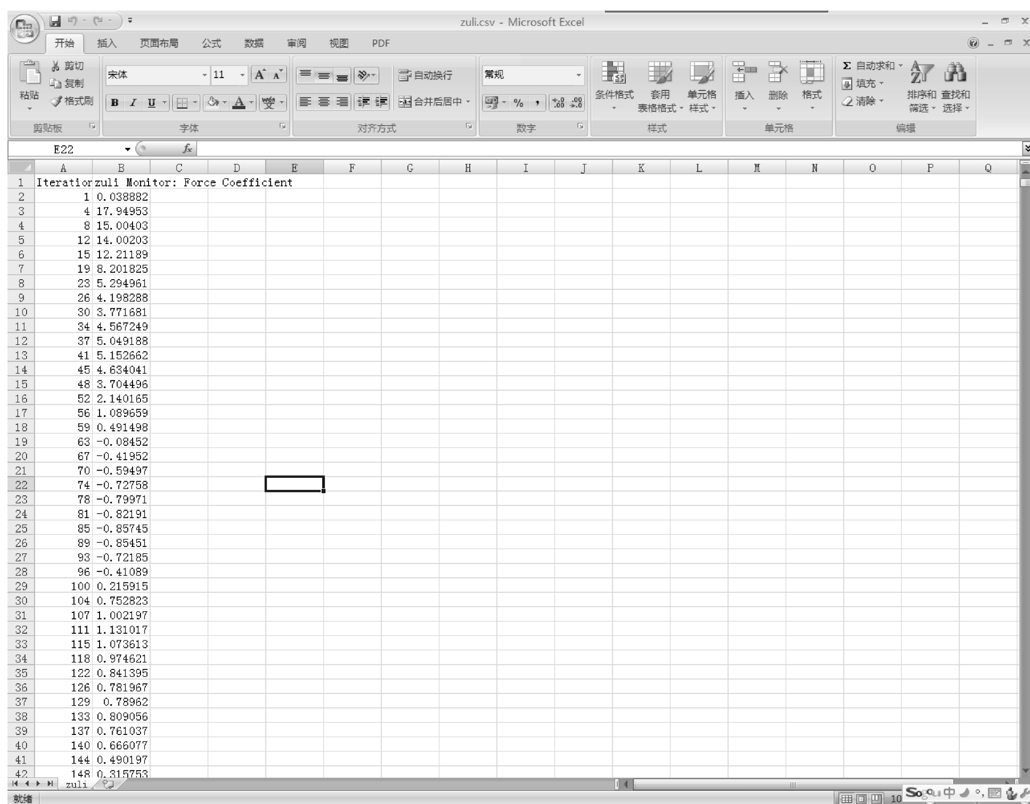


图 5-126　打开 zuli. csv

如图 5-127 所示，选择“zuli. csv”第二列中第 8000 步～第 10000 步的阻力系数值，选择函数“平均值”功能，求取整车阻力系数，计算结果按第 8000 步～第 10000 步内的平均值。如图 5-128 所示，整车阻力系数平均值约为 0. 342203。

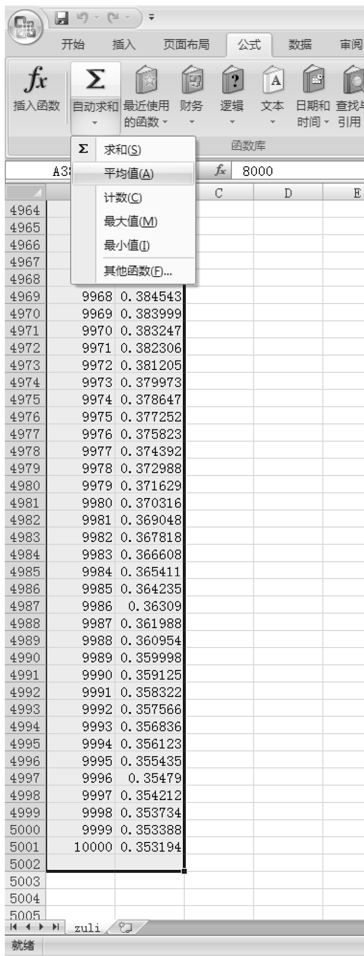


图 5-127　求取整车阻力系数平均值

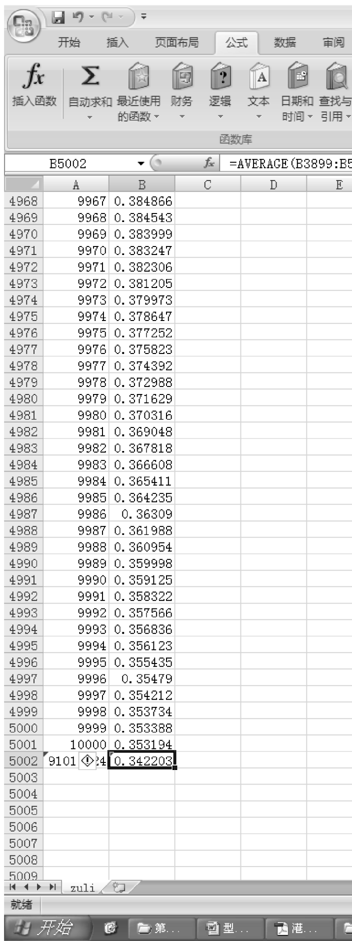


图 5-128　整车阻力系数平均值

依照上述方法可完成头车、中间车、尾车和风挡区域的阻力系数统计。

2. 鼻端处压力

鼻端处压力值为最大正压，其计算曲线如图 5-129 所示。可以看出，鼻端处压力值稳定在 5790 ~ 5970Pa 之间，收敛效果较好。

5.3.2　车体表面压力分布的显示

右键选择[Scenes] > [New Scene] > [Scalar](图 5-130)，或点击工具栏图标[Create/Open Scenes] > [Scalar](图 5-131)，在视图区显示压力云图。选择[Scenes] > [Scalar Scene 1] > [Displayers] > [Scalar 1] > [Parts]，在属性栏“Parts”项中选择要显示的车体表面边界，如图 5-132 所示。

选择[Scenes] > [Scalar Scene 1] > [Displayers] > [Scalar 1] > [Scalar Field]项，在属性栏“Function”项中选择“Pressure”作为显示变量，如图 5-133 所示。

列车表面压力云图如图 5-134 所示。可以看出，车体表面压力值在头车鼻端处最大，沿着过渡区域逐渐降低。

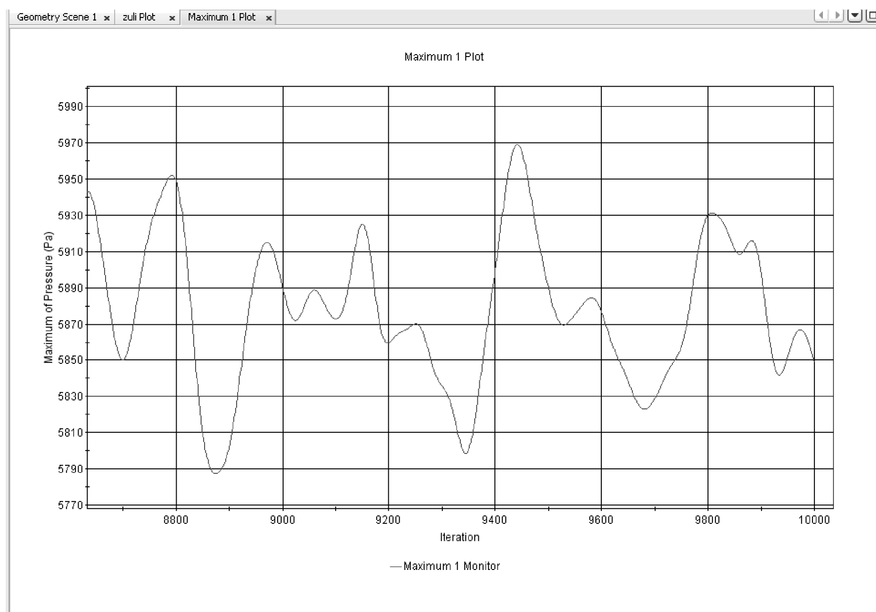


图 5-129 鼻端处压力值的计算曲线

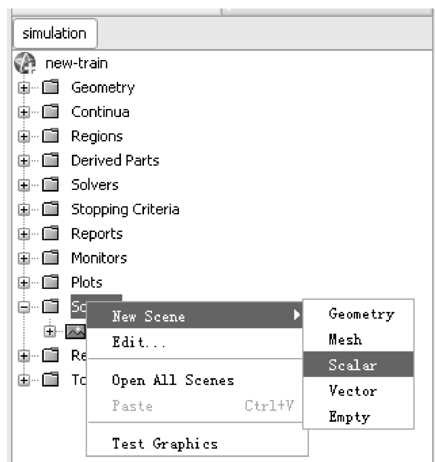


图 5-130 通过树形菜单创建 Scalar

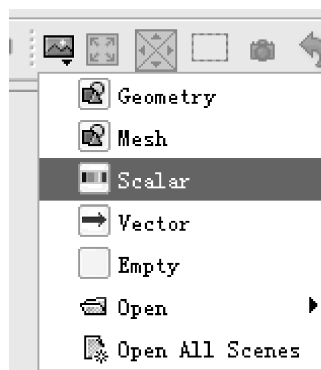


图 5-131 通过工具栏创建 Scalar

在压力云图属性栏中，列车表面压力的最大值、最小值如图 5-135 所示。改变列车表面压力最小值为 -6000Pa，如图 5-136 所示。

显示范围改变后的压力云图如图 5-137 所示。

5.3.3 车体表面区域的流场显示

车体表面区域的流场显示可通过截面上的速度矢量图形式显示。如图 5-138 所示，右键选择[Derived Parts]>[New Part]>[Section]>[Plane...]，新建截面“Plane Section”。

如图 5-139 所示，选择截面的默认设置，即车体中间截面。

设定好的车体中间截面如图 5-140 所示。

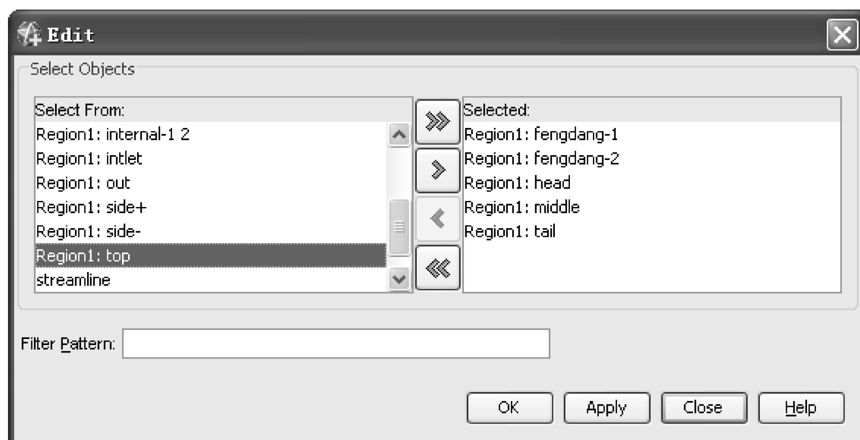


图 5-132　选择车体表面边界

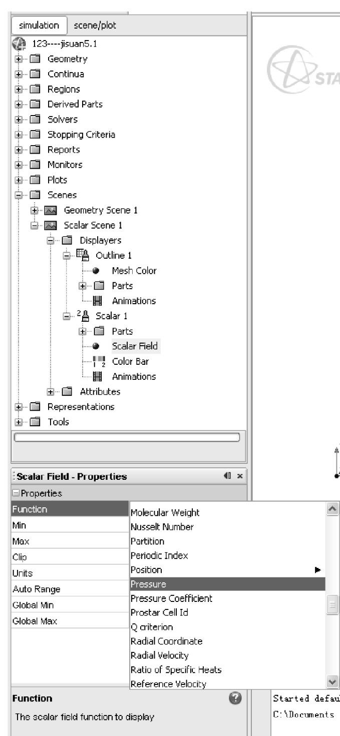


图 5-133　选择压力作为显示变量



图 5-134　列车表面压力云图

右键选择[Scenes] > [New Scene] > [Vector]，新建 Vector Scene1，如图 5-141 所示。

选择[Scenes] > [Vector Scene1] > [Displayers] > [Vector 1] > [Parts]，选择截面“plane section”，如图 5-142 所示。

选择[Scenes] > [Vector Scene1] > [Displayers] > [Vector 1]，在属性栏中的“Projection Mode”项中选择“Tangential”方式，即选择沿流向的分速度，如图 5-143 所示。同时修改

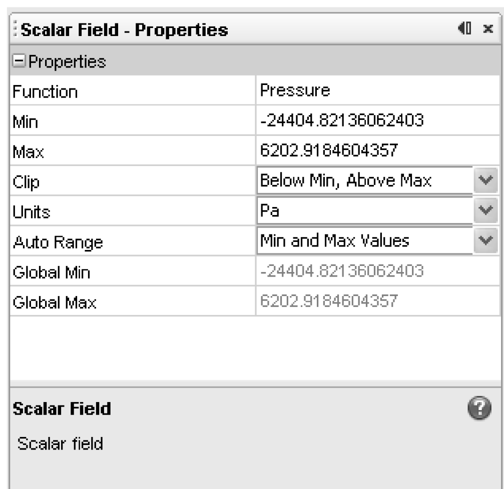


图 5-135 列车表面压力的最大值、最小值

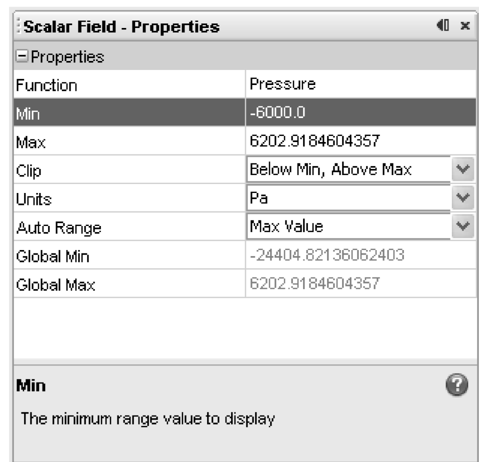


图 5-136 改变列车表面压力最小值

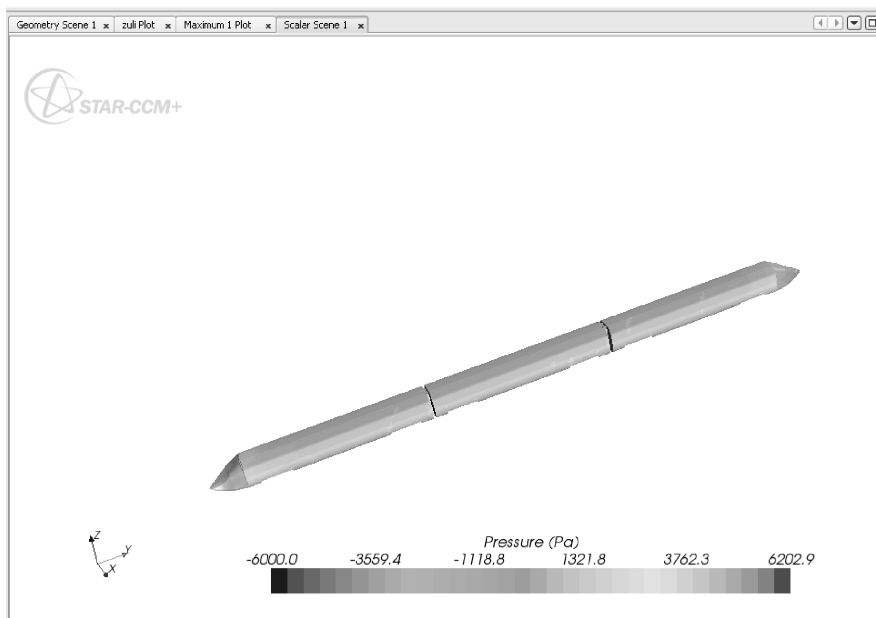


图 5-137 显示范围改变后的压力云图

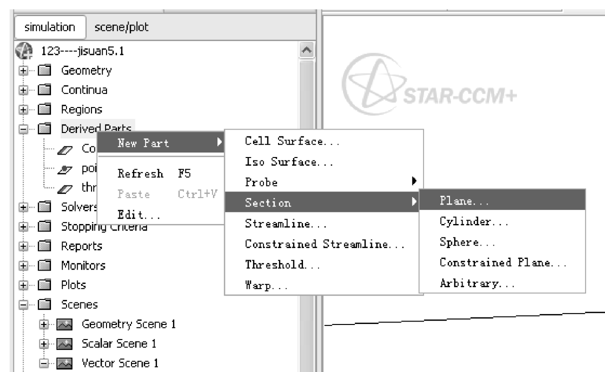


图 5-138 新建截面

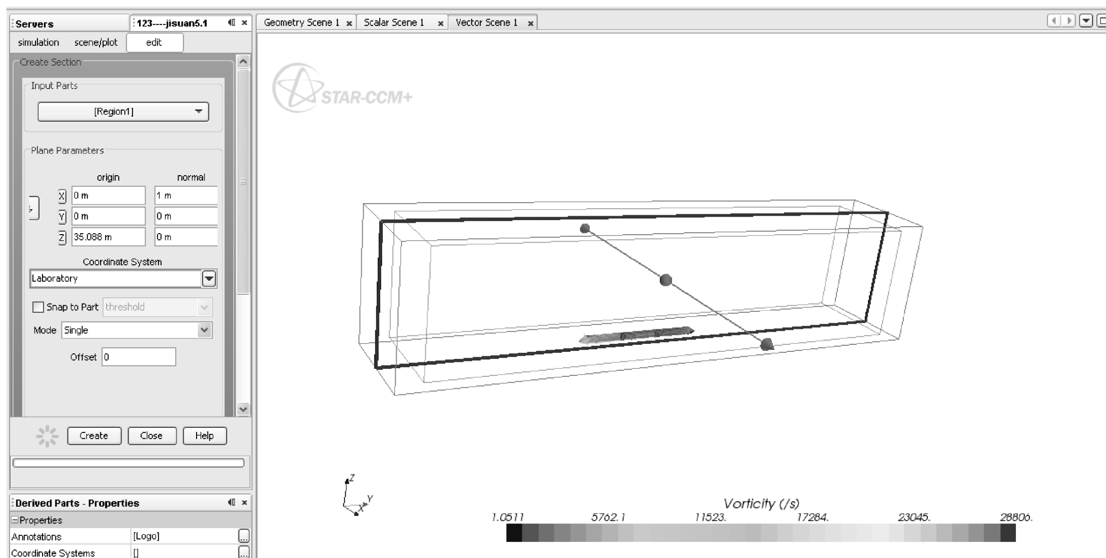


图 5-139　确定截面位置

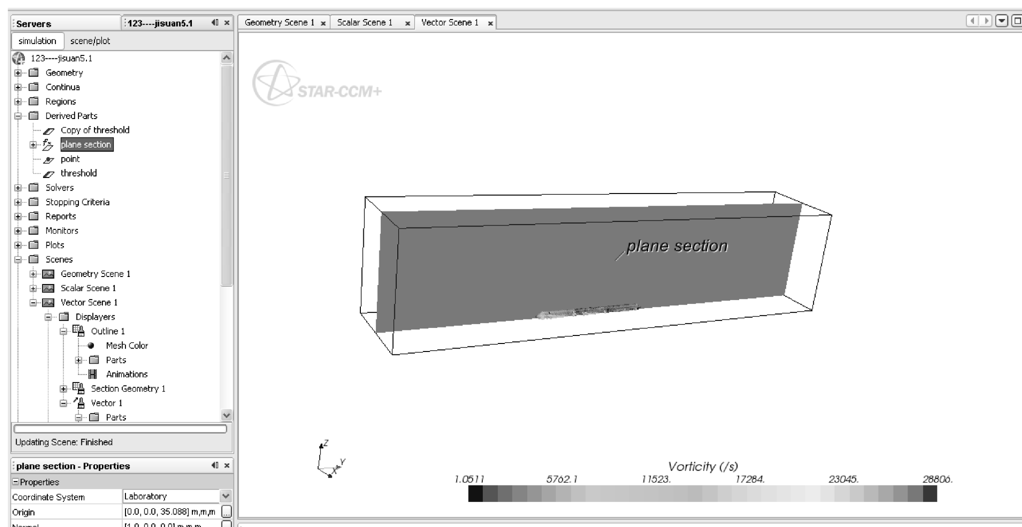


图 5-140　车体中间截面

“Vector Scale”项为“Absolute”，修改“Vector Length”项为“Constant Length”，即速度矢量定长度显示的方式，如图 5-144 所示。

风挡和转向架区域速度矢量图如图 5-145 所示。可以看出，风挡和转向架区域的空腔内存在较为明显的回流、漩涡现象，这些部位的流场对列车阻力均有较大的影响。

5.3.4　车体流线的动画显示

1. 车体附近区域的流场显示方法

如图 5-146 所示，右键选择[Derived Parts] > [New Part] > [Streamline...]，出现“Create Streamline”对话框。依次选择 Input Parts：Region1、Vector Field：Velocity、Seed Mode：

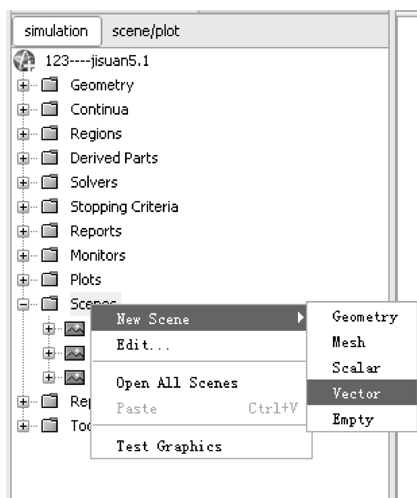


图 5-141　新建 Vector Scene1

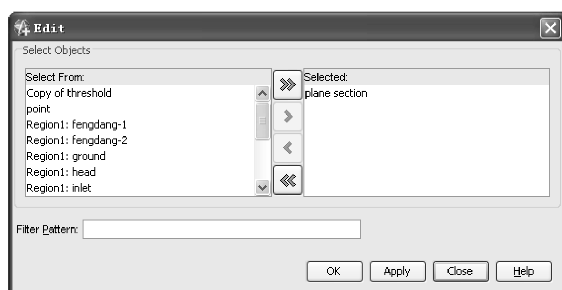


图 5-142　选择截面“plane section”

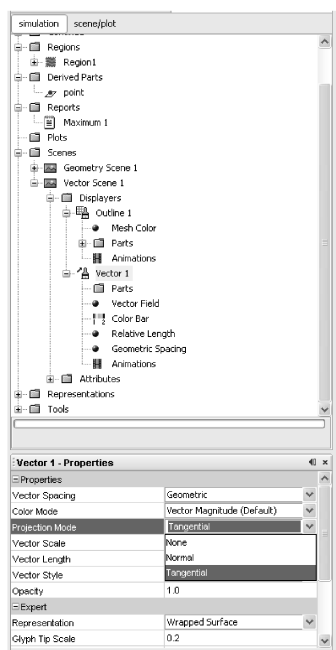


图 5-143　选择沿流向的分速度

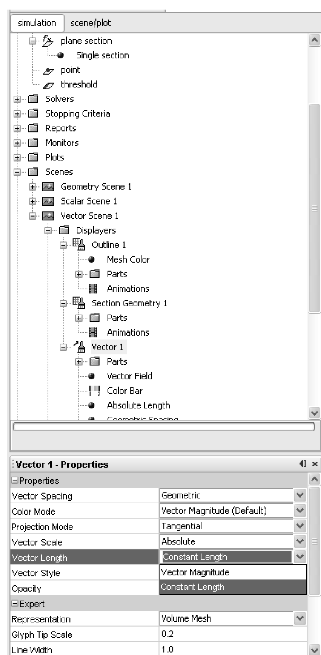


图 5-144　速度矢量定长度显示

Part Seed。在“Seed Parts”栏选择[Region1：inlet]，在“Part U-Resolution”栏和“Part V-Resolution”栏中均填入 10，选中[Display]>[New Streamline Displayer]，如图 5-147 所示。点击“Create”按钮生成流线，然后点击“Close”按钮退出。

2. 制作动画

如图 5-148 所示，右键选择[Scenes]>[Scalar Scene 1]>[Displayers]>[New Displayer]>[Streamline]，在视图区显示流线。

如图 5-149 所示，在生成的 Streamline 1 下的“Parts”项中输入流线“streamline”。点击

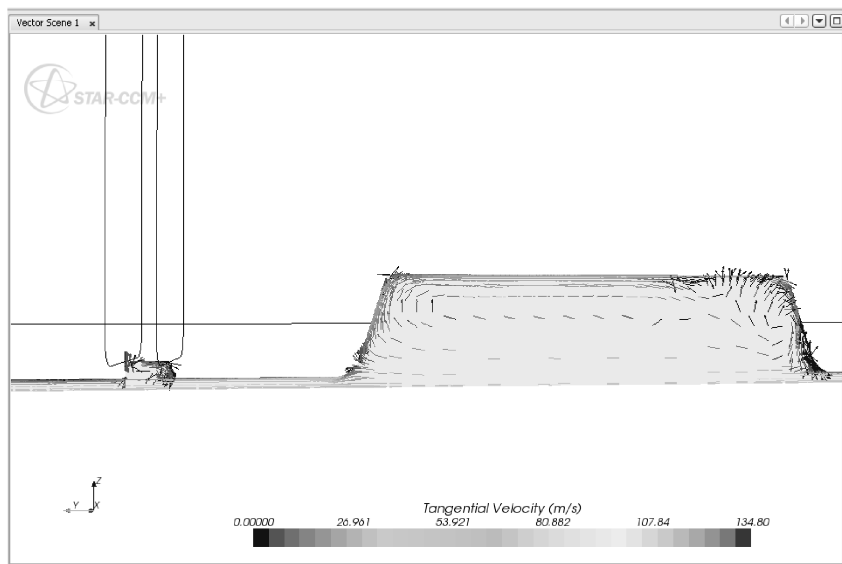


图 5-145　风挡和转向架区域速度矢量图

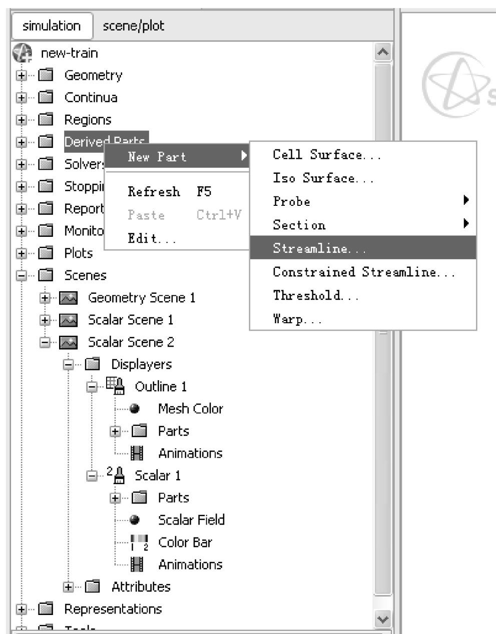


图 5-146　制作流线

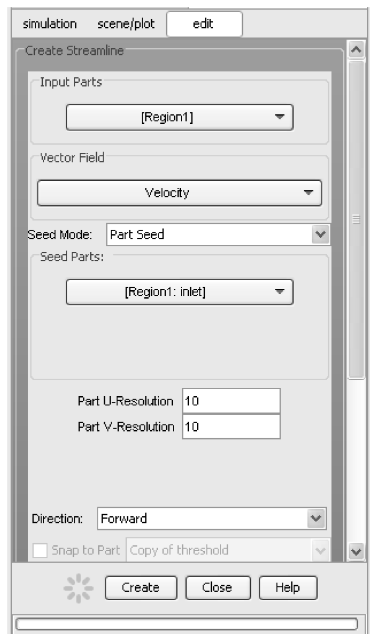


图 5-147　输入流线设置

[Scenes] > [Scalar Scene 1] > [Displayers] > [Streamlines 1] > [Scalar Field]，将其属性栏中的“Function”项改为“Pressure”。

点击[Scenes] > [Scalar Scene 1] > [Displayers] > [Streamline Stream 1] > [Animations]，在属性窗口[Animation Mode]的下拉菜单中选择“Tracers”项，激活动画功能，如图 5-150 所示。

点击[Scenes] > [Scalar Scene 1] > [Displayers] > [Streamlines 1] > [Animations] > [Streamline Settings]，填入以下参数，如图 5-151 所示。

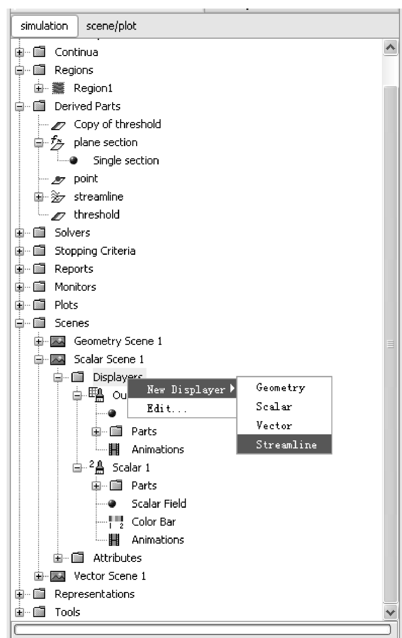


图 5-148　显示流线

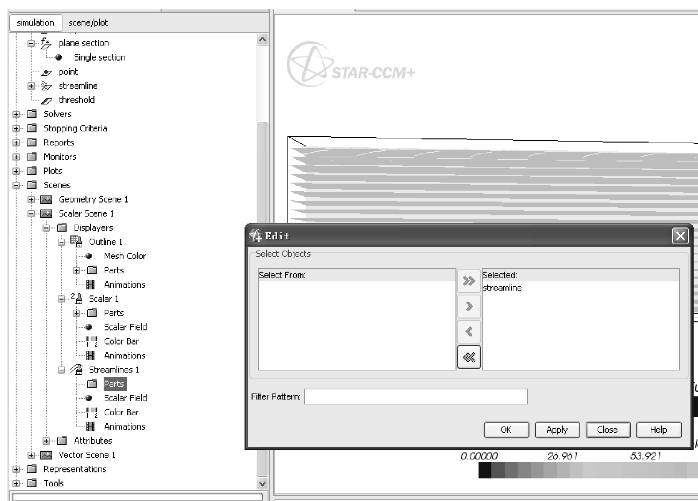


图 5-149　选择 parts

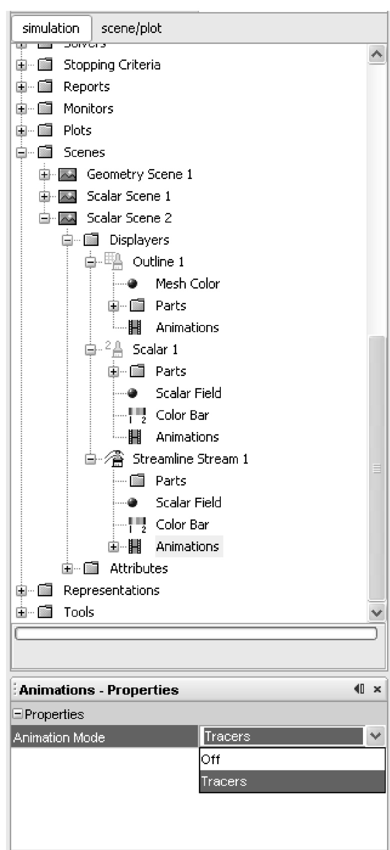


图 5-150　激活动画功能

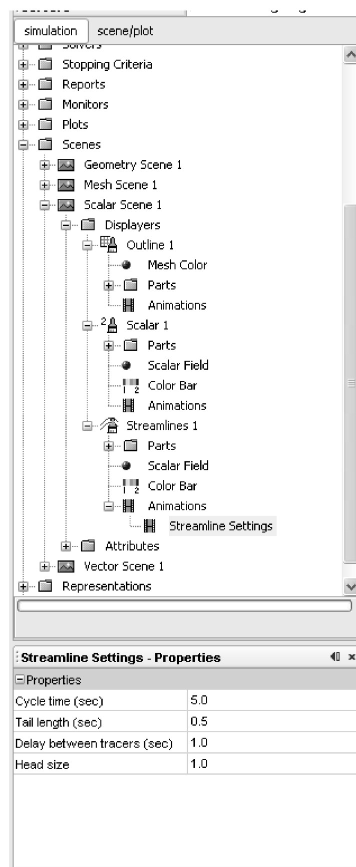


图 5-151　流线动画设置

Cycle time(sec)： 5.0

Tail length(sec)： 0.5

Delay between tracers(sec)： 1.0

Head size： 1.0

点击工具栏按钮▶，运行动画显示，如图 5-152 所示。

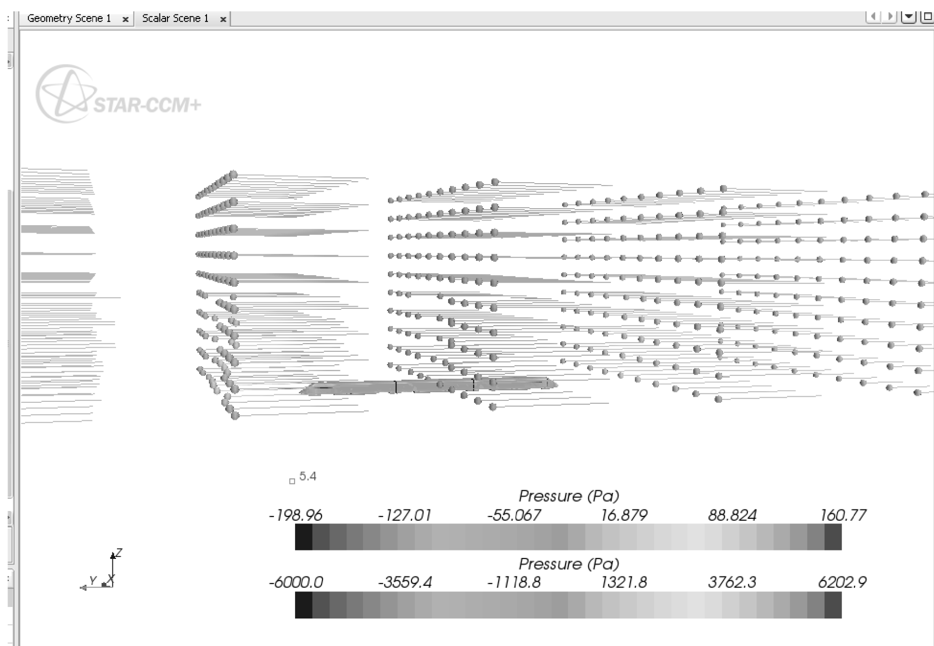


图 5-152 运行动画显示

3. 输出动画

点击工具栏按钮■，停止动画播放。同时点击工具栏按钮■，在弹出的“Write animation”对话框中填写动画输出参数并指定文件名，点击“保存”按钮。各项动画输出参数的说明如图 5-153 所示。



图 5-153 输出动画

① Frame Rate：每秒的帧数(默认:25 帧/s)。

② Start Time：动画开始时刻。

③ Animation Length：动画持续的时间长度，以 s 计。

④ Size：动画画面的长宽尺寸，以 mm 计。

⑤ Movie Type：

> AVI movie(默认)：输出 AVI 格式的动画。

> Directory of PNG frames：将每帧动画以 PNG 格式的图片输出。

如图 5-153 所示的设定，共计输出 25 帧/s × 10s = 250 帧图片。

5.3.5 计算结果的导出

将网格或计算结果导出成 Fieldview 软件适用的格式。如图 5-154 所示，点击菜单项[File] > [Export...]，出现如图 5-155 所示的“Export File”对话框。

如果只导出网格，在“Export”项中选择“Mesh only”，如图 5-156 所示；如果只选择导出计算结果，在“Export”项中选择“Solution data only”；如果同时导出网格和计算结果，在“Export”项中选择“Mesh and solution data”。

输入文件名“. ccm”，点击“OK”按钮，保存文件成功。

点击菜单[File] > [Save as]，如图 5-157 所示，在弹出的“保存”对话框中输入文件名“train-wuhengfeng”，点击“保存”按钮保存以上所有操作。

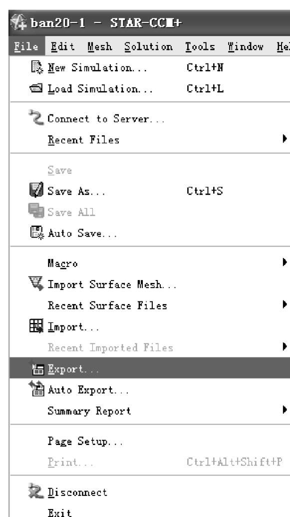


图 5-154 选择菜单导出项



图 5-155 “Export File”对话框



图 5-156　导出选项

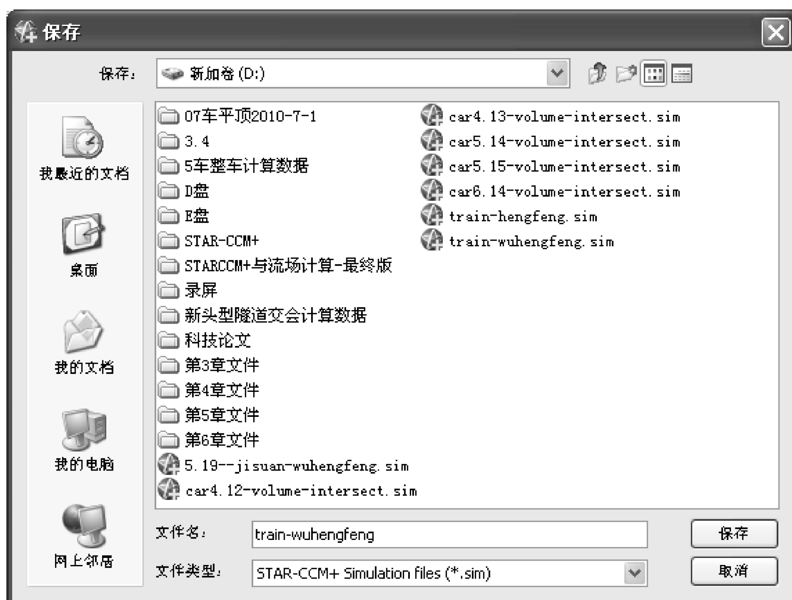


图 5-157　保存所有操作

5.4　高速列车横风性能研究

本节进行高速列车横风性能计算。

在该项计算开始前，需要保留计算用的网格和清除之前的明线运行计算结果。如图 5-158 所示，点击菜单项[Solution] > [Clear Solution...]，在弹出的“Clear Solution”对话框(图 5-159)中选择“Yes”，即成功清除之前的明线运行计算结果。

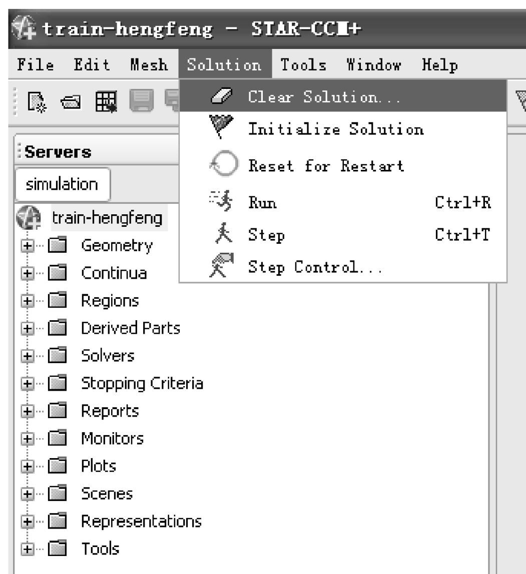


图 5-158　清除明线运行计算结果

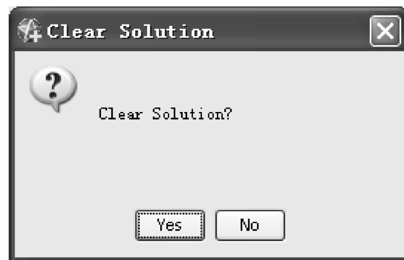


图 5-159　确定清除

5.4.1　边界条件设置

1. 速度入口、压力出口边界条件的设置方法

假设入口边界来流的三维速度分布没有受到模型的扰动，除来流速度方向外，另外两个方向的速度分量为零，而横风从与入口面相邻的一个侧面法向进入，从另一个侧面或出口流出。故在明线无侧风运行工况计算边界条件设置的基础上，将两个侧面分别设置为速度进口、压力出口即可。

对于入口边界条件，保持“inlet”边界条件不变，选择“side+”边界，将侧风按进口风速 15m/s 设置。对于出口边界条件，保持“outlet”边界条件不变，选择“side-”边界，设置为压力出口边界条件，出口压力取一个标准大气压强。列车表面、计算域顶面、地面边界条件保持不变。

2. 源场边界条件的设置方法

本例中采用另一种设置方式，即考虑计算域入口、出口、顶面和两个侧面均为源场边界条件。以入口边界的设置为例，源场边界条件的设置方法如下：

选择[Regions]>[Region 1]>[Boundaries]>[inlet]，将其属性栏中的“Type”项改为“Free Stream”，即源场边界条件方式，如图 5-160 所示。

选择[Regions]>[Region 1]>[Boundaries]>[inlet]>[Physics Conditions]>[Flow Direction Specification]，将其属性栏中的“Method”项改为“Components”，即采用速度分量的方式，如图 5-161 所示。

选择[Regions]>[Region 1]>[Boundaries]>[inlet]>[Physics Values]>[Flow Direction]>[Constant]，将其属性栏中的“Value”项改为“[0.153,0.988,0.0]”，设置速度向量，如图 5-162 所示。

选择[Regions]>[Region 1]>[Boundaries]>[inlet]>[Physics Values]>[Mach Number]>[Constant]，将其属性栏中的“Value”项改为“0.28926”，如图 5-163 所示。该马赫

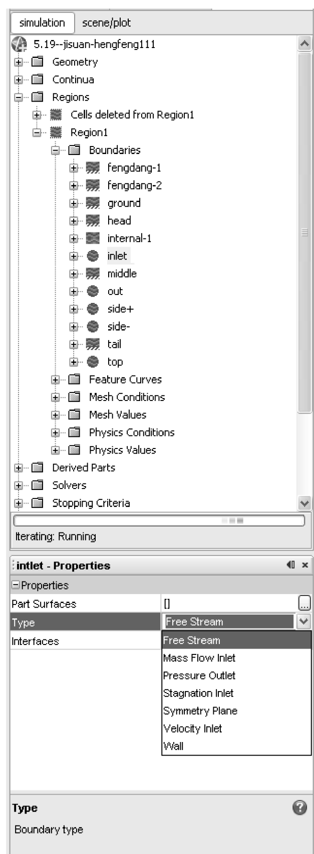


图 5-160　Free Stream 属性

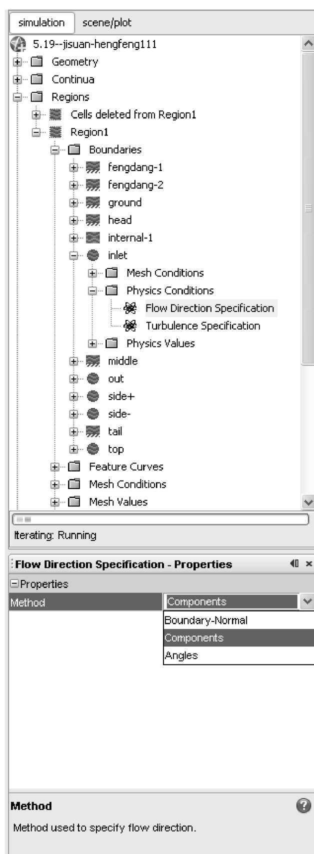


图 5-161　采用速度分量的方式

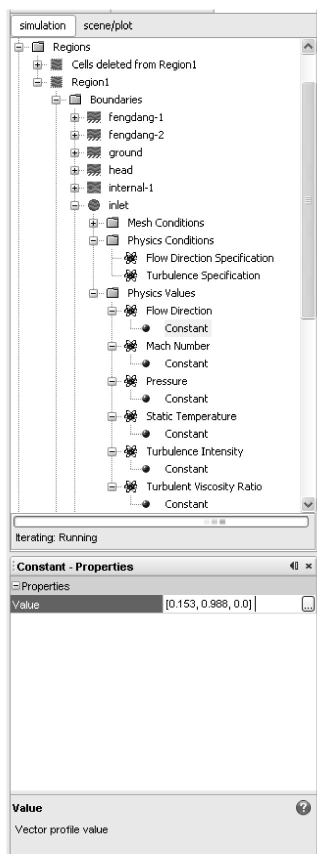


图 5-162　设置速度向量

数对应的是列车速度与横风风速的合速度大小。

选择[Continua] > [Physics 1] > [Boundaries] > [Initial Conditions] > [Velocity] > [Constant]，将其属性栏中的“Value”项改为“[15.0,97.2,0.0]”，初始化来流方向，如图 5-164 所示。

本例中还进行了头车倾覆力矩的计算。如图 5-165 所示，将该项改名为“Moment Coefficient-head”，力矩的设置如属性栏中各项所示。其中，“Reference Radius”项指列车的参考半径，可取为车高；“Axis”项指沿 X 向的力矩，即倾覆力矩。改变属性栏“Parts”项为“Region1：head”。

对于列车的安全性来说，倾覆力矩作用于背横风处钢轨内侧(数值更大)比作用于列车重心位置更能直接反映列车的倾覆情况，因此，在取倾覆力矩时，取列车背风侧钢轨内侧的轮轨接触线为取矩轴。

按照同样的方法生成中间车倾覆力矩“Moment Coefficient-mid”和尾车倾覆力矩“Moment Coefficient-tail”，基本设置不变，只需分别改变属性栏“Parts”项为“Region1：mid”和“Region1：tail”。

5.4.2　计算结果分析

侧风工况下的列车阻力计算曲线如图 5-166 所示。可以看出，侧风工况下的列车阻力系

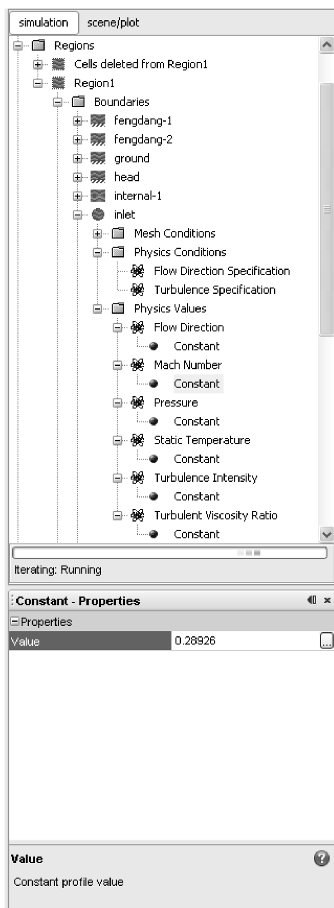


图 5-163　设置源场马赫数

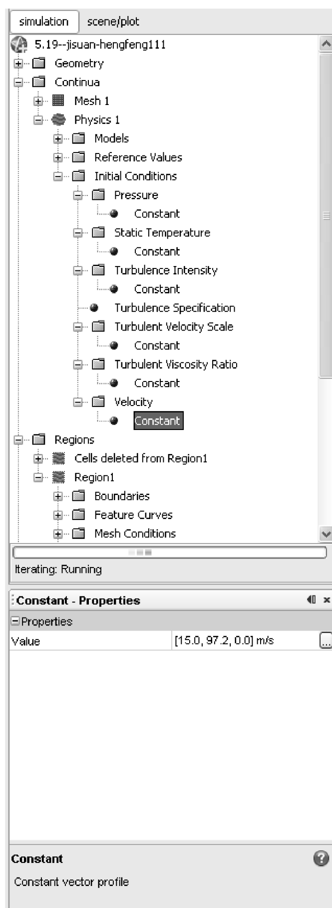


图 5-164　初始化来流方向

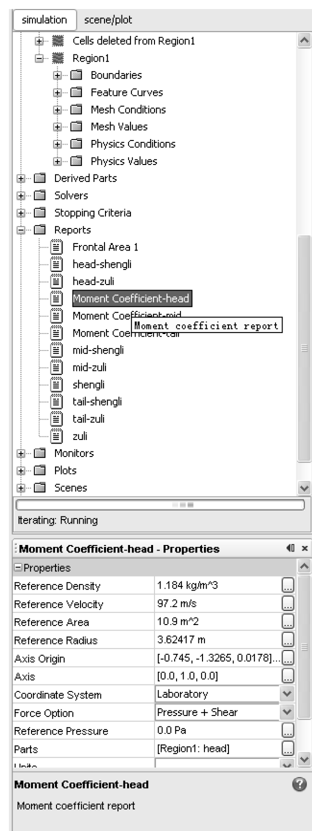


图 5-165　头车力矩的设置

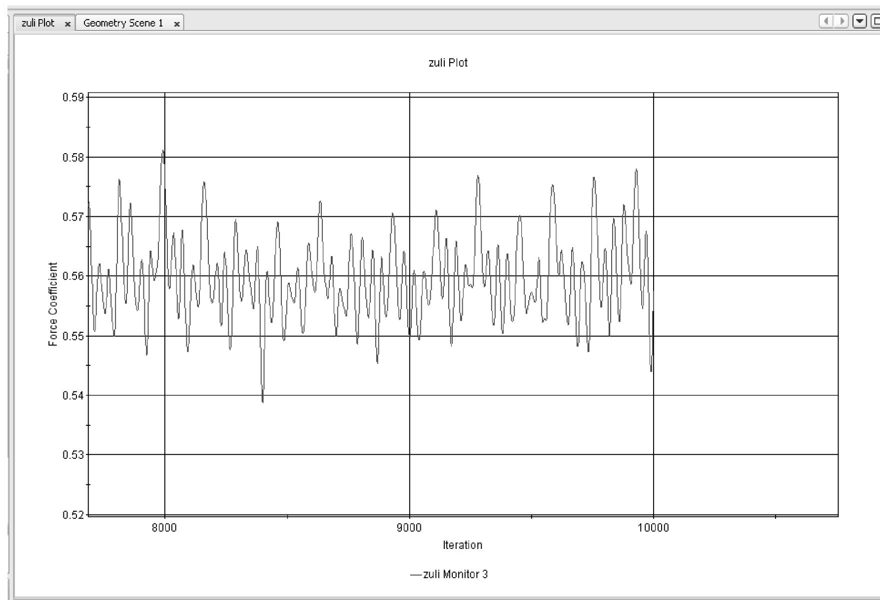


图 5-166　整车阻力计算曲线

数大约为 0. 56，相对于无侧风工况下的阻力增加 60% 左右。

侧风工况下的列车头车阻力计算曲线如图 5-167 所示。

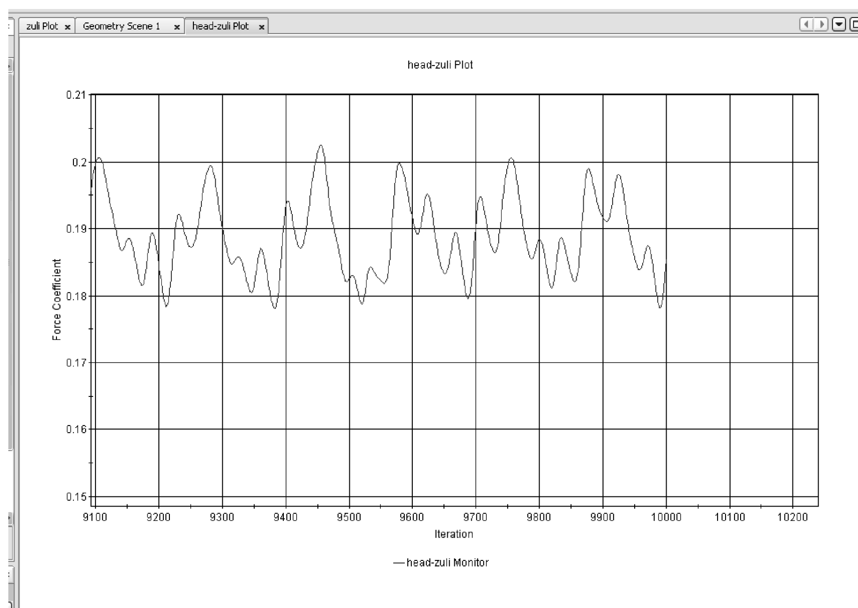


图 5-167　头车阻力计算曲线

侧风工况下的列车头车、中间车、尾车倾覆力矩计算曲线如图 5-168 ~ 图 5-170 所示。可以看出，侧风工况下头车的倾覆力矩最大，最易发生倾覆。

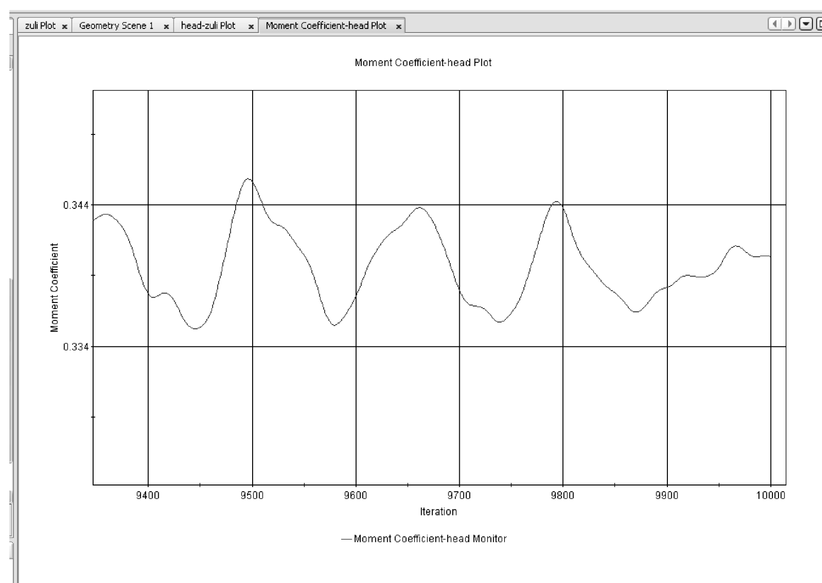


图 5-168　头车倾覆力矩

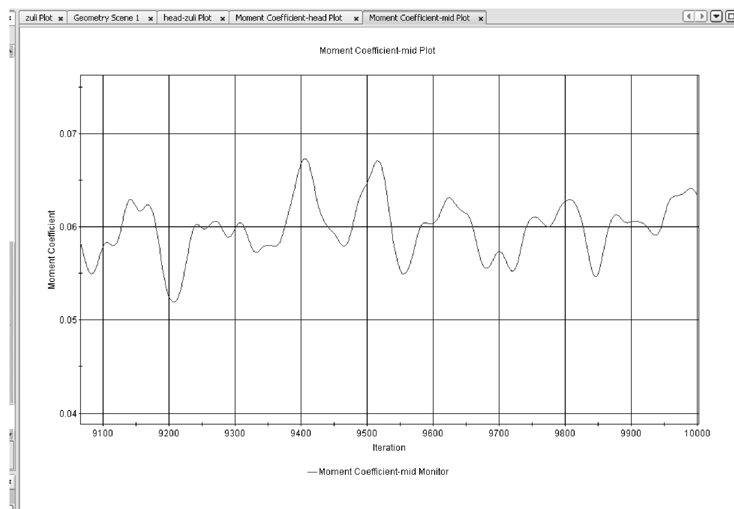


图 5-169 中间车倾覆力矩

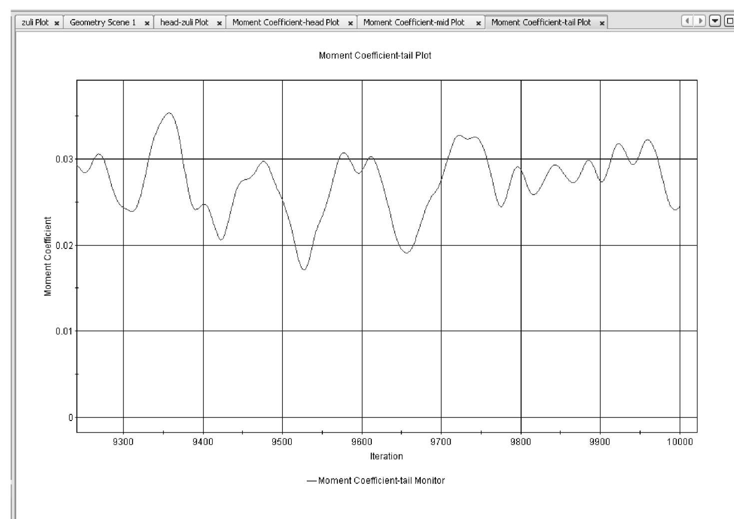


图 5-170 尾车倾覆力矩

5.4.3 侧风条件下的压力分布和流场显示

右键选择[Scenes]>[New Scene]>[Scalar]，选择[Scenes]>[Scalar Scene 1]>[Displayers]>[Scalar 1]>[Parts]，在属性栏“Parts”项中选择车体表面边界。

选择[Scenes]>[Scalar Scene 1]>[Displayers]>[Scalar 1]>[Scalar Field]项，在属性栏“Function”项中选择“Pressure”作为显示变量，如图 5-171 所示。

由图 5-171 可以看出，头车压力云图不再是对称分布的情况，其中迎风面一侧压力较高，背风面一侧压力相对较低。

侧风条件下的流场显示可通过截面上的速度矢量图形式显示。右键选择[Derived Parts]>[New Part]>[Section]>[Plane...]，新建截面“Plane Section”。如图 5-172 所示，在左侧属

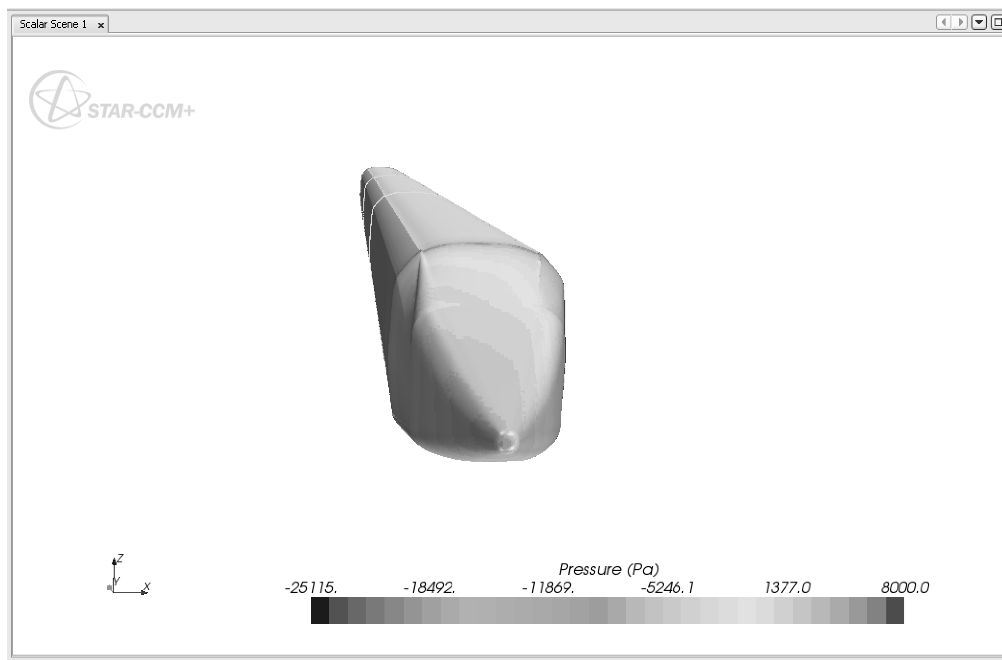


图 5-171　侧风条件下的压力分布

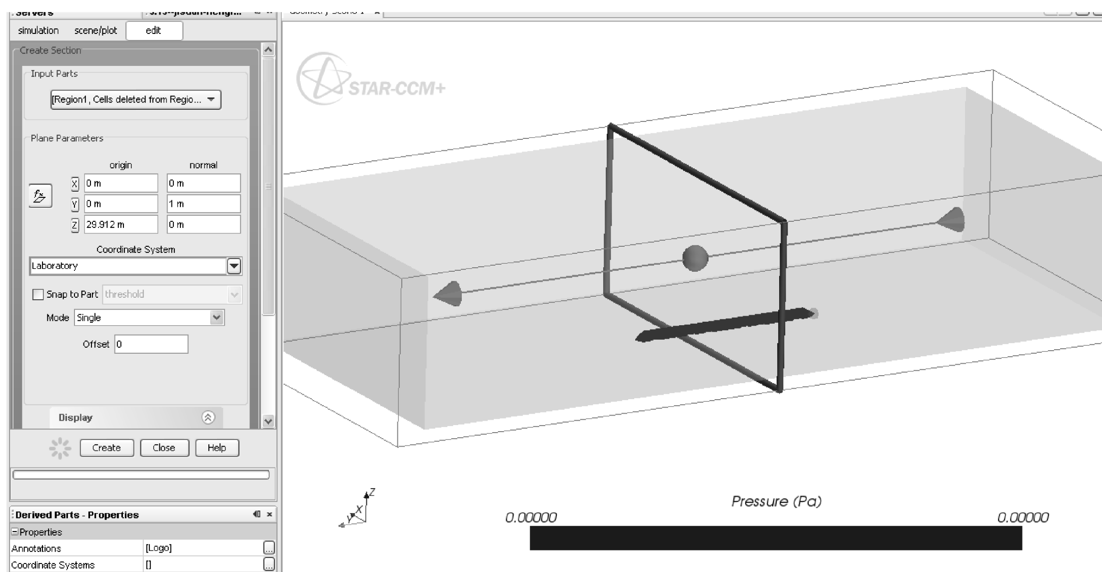


图 5-172　生成截面

性栏中输入相关参数，点击“Create”按钮，生成截面。

右键选择[Scenes] > [New Scene] > [Vector]，新建 Vector Scene 1。选择[Scenes] > [Vector Scene1] > [Displayers] > [Vector 1] > [Parts]，再选择截面“plane section 2”。

选择[Scenes] > [Vector Scene 1] > [Displayers] > [Vector 1]，在属性栏中的“Projection Mode”项中选择“Tangential”方式，即选择垂直于流向的分速度。同时修改“Vector

Scale”项为“Screen Size”，修改“Vector Length”项为“Constant Length”，即速度矢量定长度显示的方式，如图 5-173 所示。

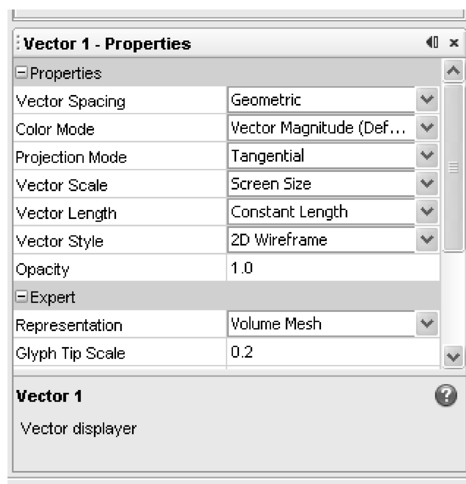


图 5-173　生成截面

垂直于列车截面的气流流场矢量图如图 5-174 所示。可以看出，列车迎风面一侧压力较高，背风面一侧压力较低，存在较为明显的回流、漩涡现象，对列车阻力和倾覆力矩均有较大的影响。

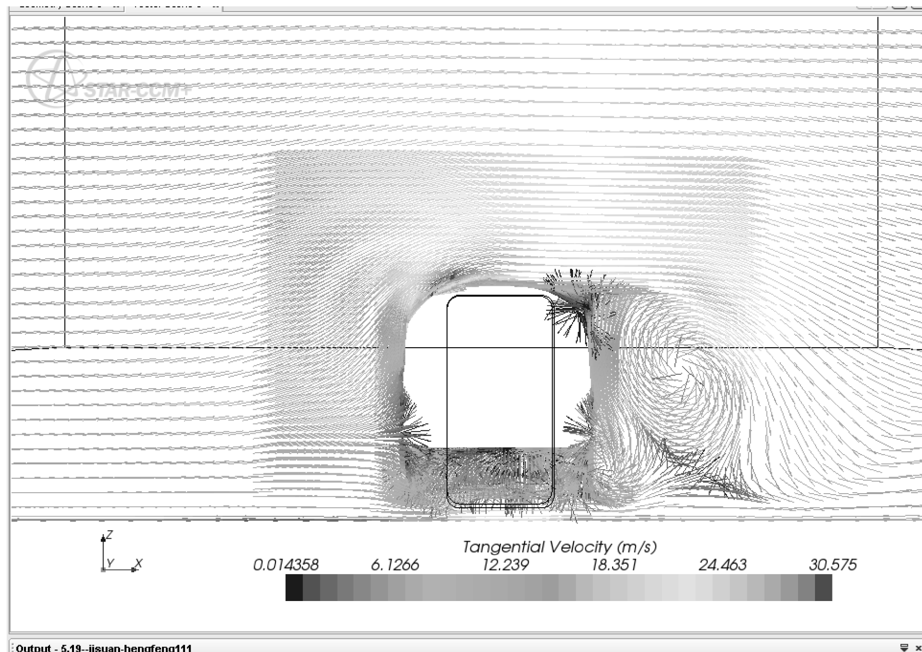


图 5-174　垂直于列车截面的气流流场

点击菜单[File]>[Save as]，如图 5-175 所示，在弹出的“保存”对话框中输入文件名“train-hengfeng”，点击“保存”按钮保存以上所有操作。

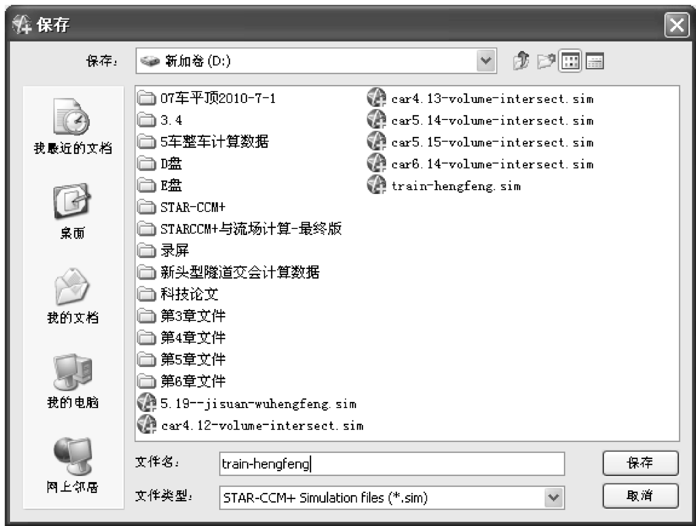


图 5-175　保存所有操作

第 6 章　Fieldview 软件介绍

Fieldview 是由全球著名的 CFD 软件商 Intelligent Light 开发的一款功能强大的 CFD 后处理软件。Fieldview 是一款功能非常强大的 CFD 后处理工具，支持各种操作平台、求解器、网格类型；既可帮助用户采用交互式或自动化方式研究 CFD 求解结果，也可对数据进行深入地探索，快速提取重要流动特征和关键值，提升 CFD 分析的价值。

Fieldview 可提供专业品质的图像和动画，拥有强大的数据演示和发布功能，可大大强化 CFD 分析结果的视觉冲击力，主要包括以下三大特点：

1. 应用广泛

Fieldview 是世界上使用最广泛的 CFD 后处理软件，广泛应用于汽车、化工、航空航天、旋转机械等行业，支持 PC Windows 和 UNIX/Linux 等多种操作系统，拥有目前市场上绝大多数 CFD 软件接口。

2. 功能强大

拥有一般 CFD 后处理工具的所有功能：云图、矢量图、等值线图；平面、等值面、边界面；流线、脉线、粒子轨道线、二维曲线；文本注释、探针取值、函数计算等。

还拥有一般 CFD 后处理工具所没有的诸多高级功能：关键帧动画；流场特征提取；动态切割；扩展编程；数据演示及发布工具等。

支持 OpenGL 模式，显示画面精美而华丽。

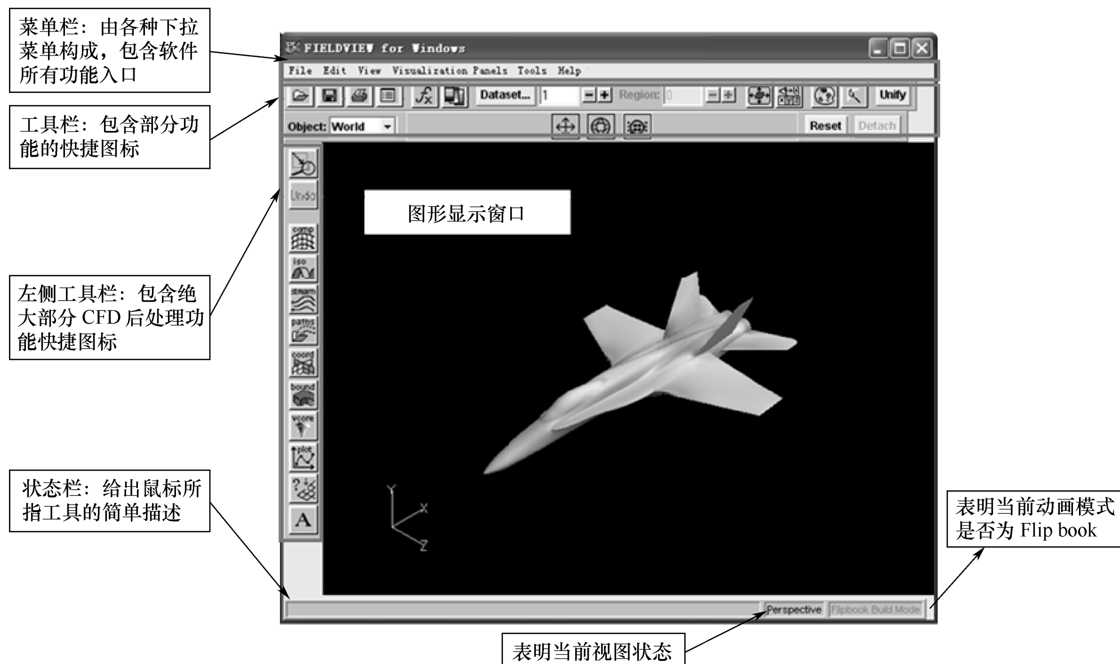


图 6-1　Fieldview 软件的主界面

3. 易学易用

统一的面板风格，几乎全鼠标操作，点击 Create 就可完成几乎所有图像。

Fieldview12.0 软件的鼠标操作十分简单：按住鼠标左键，在视图区移动，即可实现对物体的平移；按住鼠标中键，在视图区移动，即可实现对物体的旋转；按住鼠标右键，在视图区移动，即可实现对物体的缩放。该软件还常常将“Ctrl”、“Shift”按钮与鼠标联合起来，完成诸如视图区取值点定位、示意箭头标示等工作。

Fieldview12.0 软件的主界面如图 6-1 所示。其中，软件中间的“图形显示窗口”即视图区。本章将以该软件基本功能和使用案例为例，进行 Fieldview12.0 软件的介绍。

6.1　Fieldview 菜单栏的介绍

Fieldview 软件的菜单栏包括 File、Edit、View、Visualization Panels、Tools、Help 六项。

6.1.1　File 菜单

File 菜单的主界面如图 6-2 所示。其中，“Data Input”项包括可导入的各种数据格式，该项的子菜单如图 6-3 所示；“Open Restart”项包括可打开的各种后处理结果，该项的子菜单如图 6-4 所示；“Save Restart”项包括可保存的各种后处理结果，该项的子菜单如图 6-5 所示；“Print”项包括“Image(图片)”和“Plot(曲线)”两种方式，如图 6-6 所示。

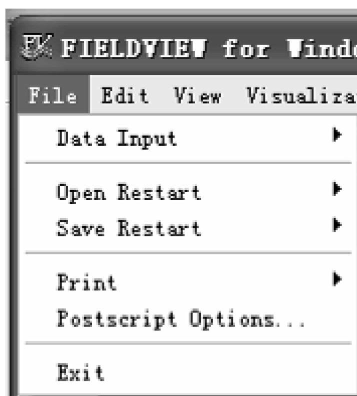


图 6-2　File 菜单的主界面

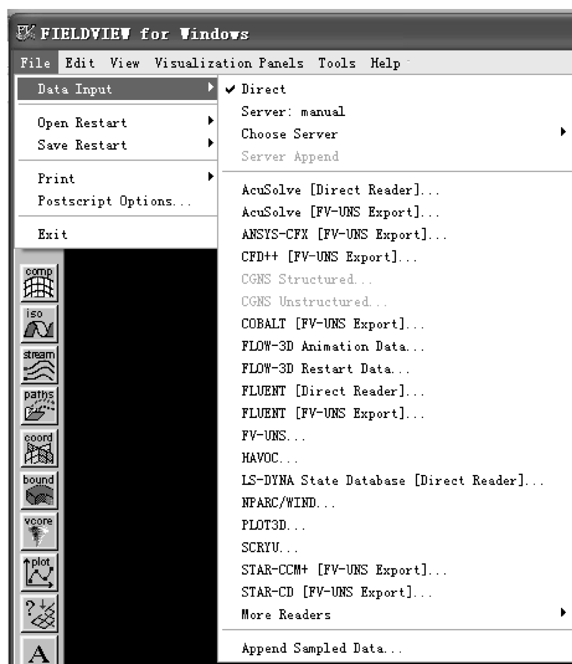


图 6-3　Data Input 的子菜单

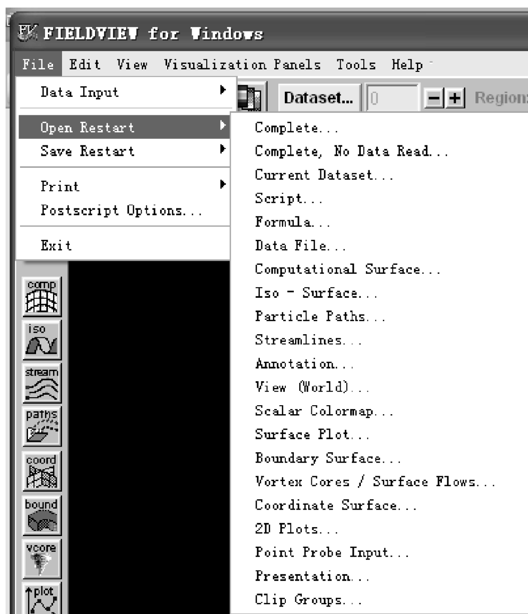


图 6-4 Open Restart 的子菜单

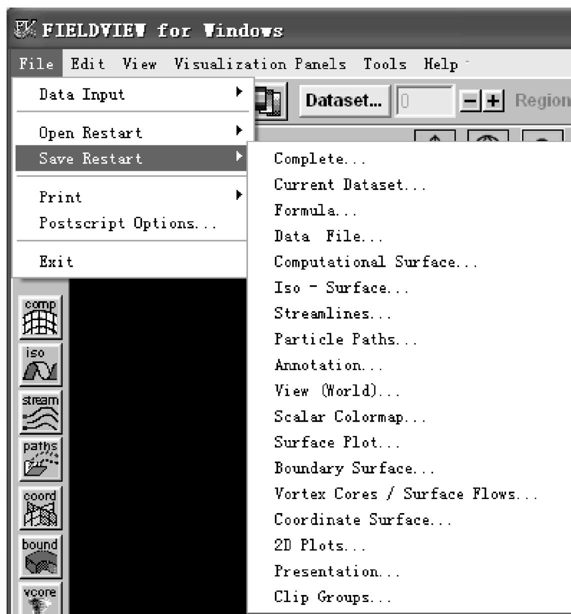


图 6-5 Save Restart 的子菜单

6.1.2 Edit 菜单

Edit 菜单的主界面如图 6-7 所示。其中，“Functions...”项可对输入的网格数据进行等值面、矢量图等操作；“Scalar Colormap...”项包括可选择的各种色图显示方式，该项的“Set Colormap”对话框和 Colormap 的选项分别如图 6-8 和图 6-9 所示；“Copy”项包括“Image(图片)”和“Plot(曲线)”两种方式，可对图片和曲线进行保存操作。

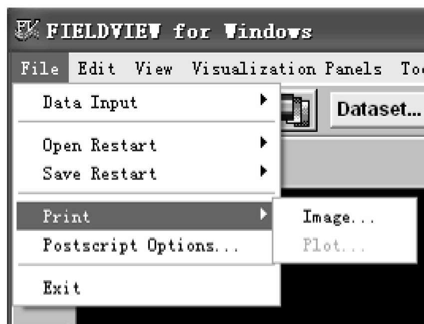


图 6-6 Print 的子菜单



图 6-7 Edit 菜单的主界面

6.1.3 View 菜单

View 菜单的主界面如图 6-10 所示。View 菜单的各个子菜单项对应不同的视图区显示方式，如定义视图位置(Define...)、更改背景颜色(Background Color...)、各帧之间的最小时间(Minimum Time Between Frames...)等。

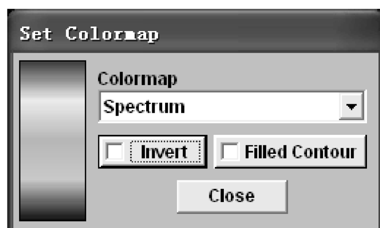


图 6-8　Set Colormap 对话框

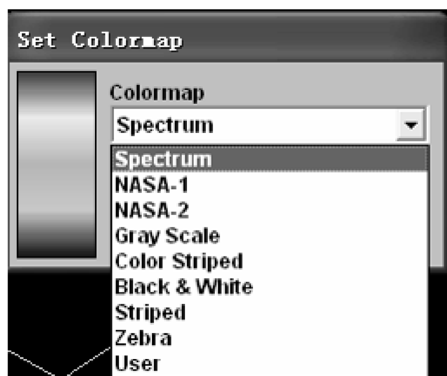


图 6-9　色图的选项

6.1.4　Visualization Panels 菜单

Visualization Panels 菜单的主界面如图 6-11 所示。Visualization Panels 菜单的各个子菜单项对应左侧工具栏的各种后处理方式。

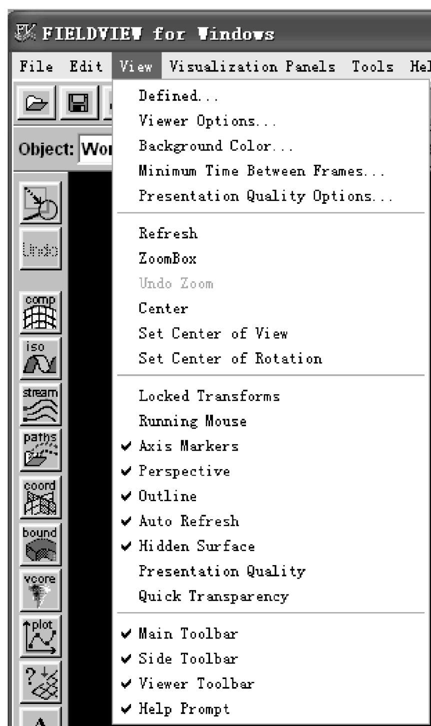


图 6-10　View 菜单

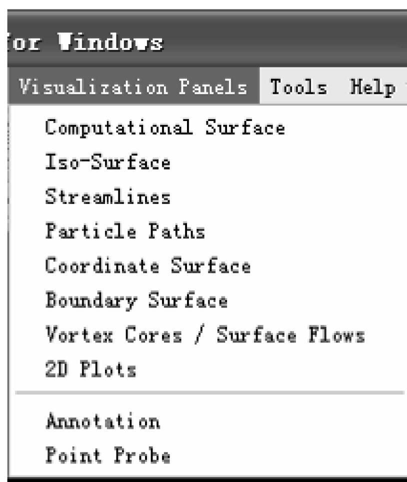


图 6-11　Visualization Panels 菜单

6.1.5　Tools 菜单

Tools 菜单的主界面如图 6-12 所示。Tools 菜单的各个子菜单项对应软件的一些高级功能，如函数积分、关键帧动画等。

6.1.6 Help 菜单

Help 菜单的主界面如图 6-13 所示。Help 菜单包括软件自带的帮助内容和帮助使用说明，并可进行相关查询。



图 6-12 Tools 菜单



图 6-13 Help 菜单

6.2 Fieldview 左侧工具栏介绍

Fieldview 左侧工具栏各项工具的功能如表 6-1 所示。

表 6-1 Fieldview 左侧工具栏各项工具的功能

工具名称	对话框英文名称	对应图标	功能
局部放大工具			放大显示所选择区域
撤销操作工具			撤销本次操作，恢复到上一步操作
计算面工具	Computational Surface		可实现计算空间的 i，j，k 平面的绘制； 支持单块、多块、混合、叠加、嵌合等多种类型结构化网格，高度保持数据的准确度； 可显示为云图、矢量图、等值线，单色图，网格； 设定域值，控制显示范围； 显示/隐藏，透明度； 整模型扫略(sweep)动画

（续）

工具名称	对话框英文名称	对应图标	功　　能
等值面工具	Iso Surface	iso	可实现任意流场标量参数等值面； 坐标等值面； 任意空间截面； 可显示为矢量图、其他标量云图或等值线，单色图，网格； 设定域值，控制显示范围； 显示/隐藏，透明度； 整模型扫略（sweep）动画
流线/脉线工具	Streamlines	stream	种子添加方法： ➢ 屏幕点、坐标点 ➢ 任意直线、曲面 ➢ 辅助平面 ➢ 矩形面、圆面、球面（new） 显示方式： ➢ 连续线 ➢ 丝带 ➢ 线段线 ➢ 点线 ➢ 球线 ➢ 单球+线 显示颜色： ➢ 标量色 ➢ 单色 显示/隐藏； 动画显示（连续线、丝带方式不支持动画）； 导出流线文件获得驻留时间
颗粒轨道线工具	Particle paths	paths	支持 STAR-CCM+、CFX 等自带的颗粒轨道记录文件； 显示方式： ➢ 连续线 ➢ 点线 ➢ 球线 ➢ 单球+线 显示颜色： ➢ 标量色 ➢ 单色 显示/隐藏； 动画显示（连续线方式不支持动画）
坐标面工具	Coordinate surface	coord	可实现 x, y, z 或 r, θ, z 平面的绘制； 可显示为云图、矢量图、等值线，单色图，网格； 设定域值，控制显示范围； 显示/隐藏，透明度； 整模型扫略（sweep）动画

（续）

工具名称	对话框英文名称	对应图标	功　能
边界面工具	Boundary Surface	bound	单个边界面或任意边界面组合； 可显示为云图、矢量图、标量等值线，单色图，外边框，网格； 设定域值，控制显示范围； 显示/隐藏，透明度
旋涡显示工具	Vortex Cores/ Surface Flows	vcore	显示流场中的旋涡和旋涡中心； 显示表面流线
二维曲线工具	2D-plot	plot	曲线类型： ➢ 空间任意两点之间直线 ➢ 坐标平面与曲面(comp,iso,bound…)相交线 ➢ 空间截面与曲面相交线 按网格采样或均匀采样； 支持嵌入式二维曲线； 支持动画显示
探针取值工具	Point Probe		按坐标定位任意位置、任意标量和矢量值； 视图区显示点； 鼠标取点时可返回该点坐标值； 点位置文件输出
注释工具	Annotation	A	可在图形界面中创建任意个注释文本； 可任意调节文本位置和大小，变换文字方向； 可在图形界面中创建注释箭头； 可任意调节箭头位置、大小和指向； 控制颜色、显示或隐藏； 箭头标注(按住“Shift”键和鼠标左键拖动即可)

6.3　其他工具

1. 函数工具

函数工具(fx,Function Specification)包括多种常规函数，以及多种高级函数：

➢ 梯度、散度、旋度函数(grad,div,curl)

➢ 可实现涡量计算(vorticity calculation,mag(curl(“velocity”)))

➢ 点积、叉积

➢ 分量提取：VecX(“Velocity”)

点击工具栏按钮fx，函数工具对话框如图6-14所示。点击对话框下方的“Create”按钮，出现“Function Formula Specification”对话框，如图6-15所示。对话框中包括“Con-

stants(常量)”、“Operations/Keys(函数)”和“Quantities(变量)”三类工具，通过该对话框可以定义用户需要分析的函数或变量，在“Formula”项的空白栏中输入函数或变量的名称即可。

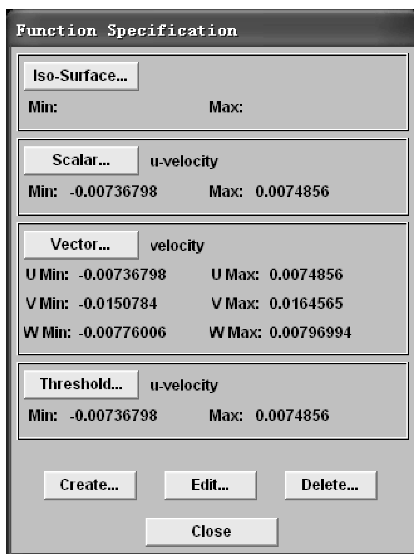


图 6-14　函数工具对话框

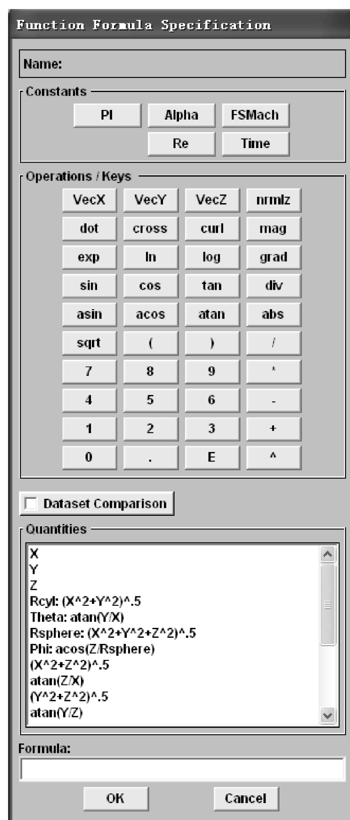


图 6-15　Function Formula Specification 对话框

2. 数值积分

数值积分(Numerical Simulation)可实现任何面(Surface)、部分面(Partial)、组面(Surface Group)的积分；可获得几何体表面的面积、通量、平均值；也可获得力，如升力、阻力。如图 6-16 所示，选择排水歧管的一个出口，可以求得该面上的截面面积、流量、平均速度、平均压力、平均温度等变量(包括标量和矢量)。

3. Flip book 动画

Flip book 动画(Flip book animation)是一种简易动画方式，方便快捷，一键生成。可动画显示任意变量在计算域内的扫掠效果。关于 Flip book 动画，后文会有详细讲述。



图 6-16　排水歧管出口的变量积分

4. 关键帧动画

关键帧动画(Key frame animation)是一种功能强大的动画制作方式。通过建立多个轨道和在不同轨道上设置关键帧，可以实现非常复杂的动画控制，包括诸如爆炸、多面多模型扫掠、渐现渐隐等特殊效果。

6.4 Fieldview 使用案例

本章通过两个小案例教会读者使用 Fieldview 软件。

6.4.1 散热器热性能计算后处理

1. 计算结果文件导入

如图 6-17 所示，选择[File]>[Data Input]>[FV-UNS...]，导入 Fieldview 软件适用格式的散热器热性能计算结果文件。如图 6-18 所示，点击对话框中的“Read Grid or Combined Data...”按钮。选择“cocurrent. uns”文件，点击“打开”按钮，导入文件，如图 6-19 所示。

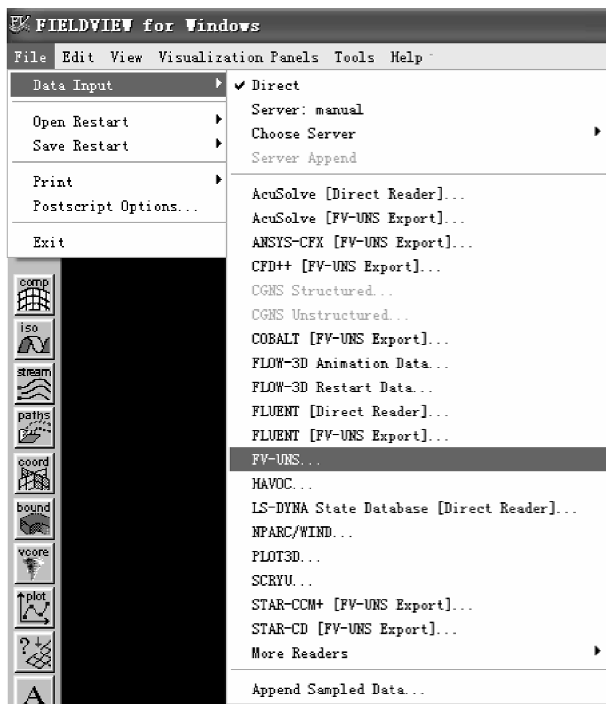


图 6-17 导入散热器热性能计算结果文件

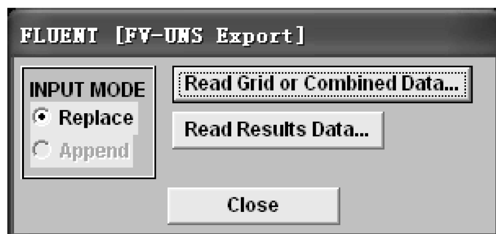


图 6-18 读入网格文件

在弹出的“Function Subset Selection”对话框中，选择“Function Names”栏中所有变量，如图 6-20 所示。点击“OK”按钮，完成计算结果的导入。

导入后的散热器的外轮廓(本题中为长方体形式)如图 6-21 所示。

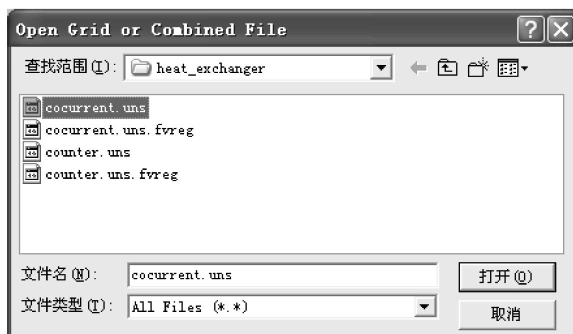


图 6-19　选择“cocurrent. uns”文件

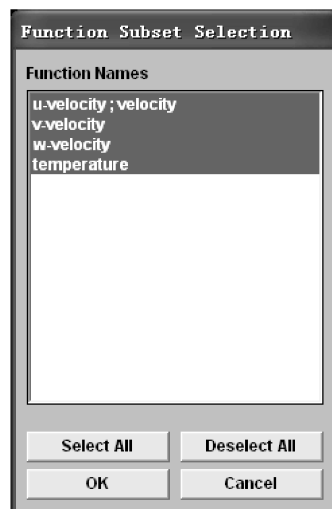


图 6-20　选择所有变量

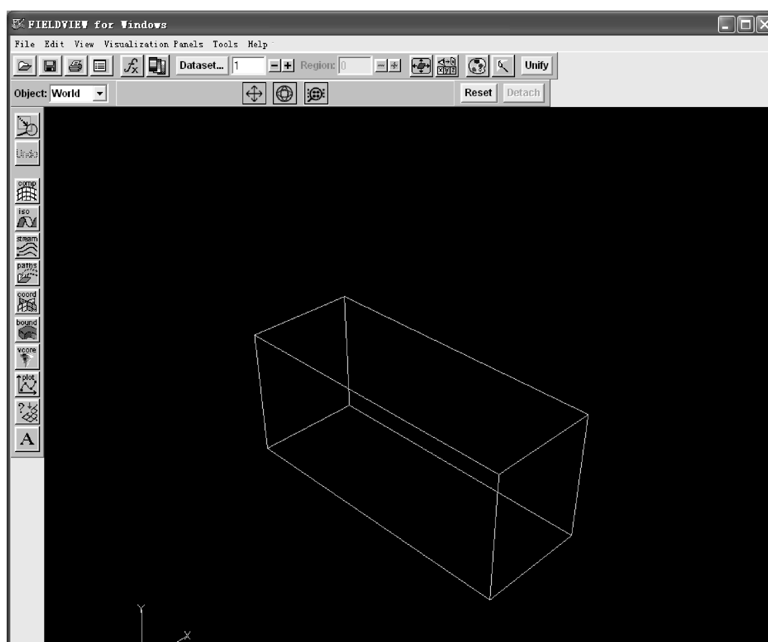


图 6-21　散热器的外轮廓

2. 散热器几何体显示

点击左侧工具栏按钮，弹出图 6-22 所示的“Boundary Surface”对话框。如图 6-23 所示，点击 tab 页“Surface”下的“Create”按钮，所有按钮生效，选择“BOUNDARY TYPES”栏中出现散热器的所有边界。

将“DISPLAY TYPE”栏中的“Mesh”项更改为“Smooth”，同时点击对话框下方“Select All”按钮，选择所有边界。点击“OK”按钮，视图区的散热器如图 6-24 所示。

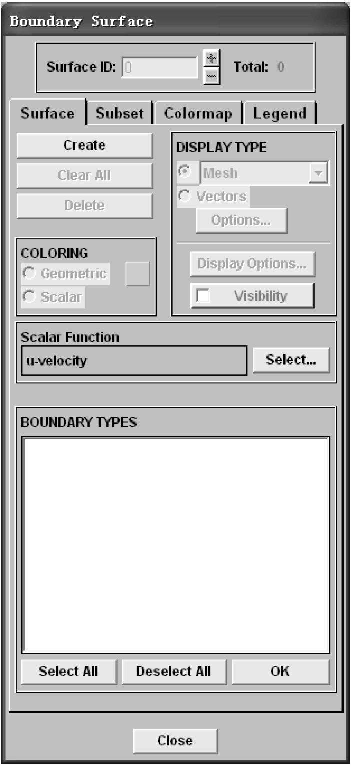


图 6-22　“Boundary Surface”对话框

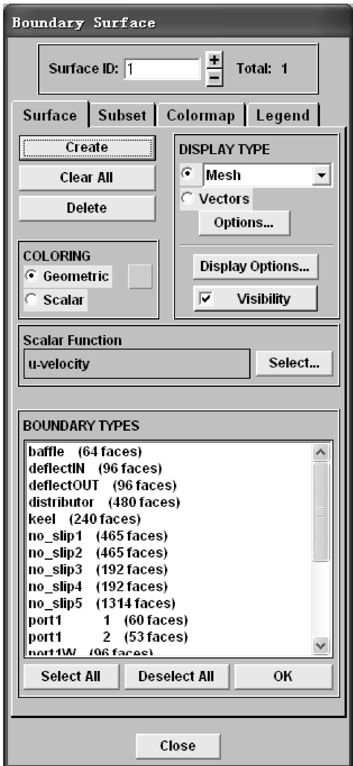


图 6-23　生成 Boundary Surface

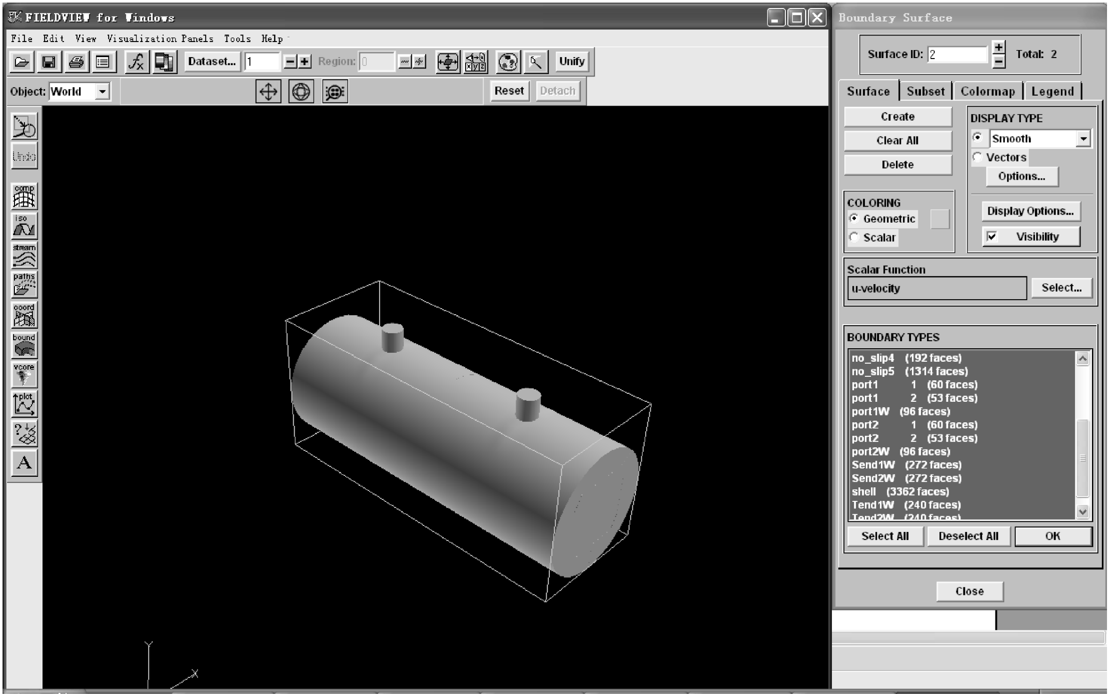


图 6-24　视图区的散热器

点击“COLORING”栏中的“Geometric”项右侧的按钮，出现图 6-25 中的“Geometry Color”对话框，选择不同的颜色，可改变视图区中散热器的颜色。

3. 散热器温度场显示

将“COLORING”栏中的“Geometric”项更改为“Scalar”，切换到变量对应的云图模式。点击“Scalar Function”栏中的“Select...”按钮，在出现的“Function Selection”对话框中选择“temperature”项作为显示变量，如图 6-26 所示。点击“Calculate”按钮，确认操作。

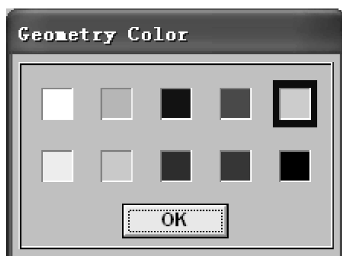


图 6-25　“Geometry Color”对话框

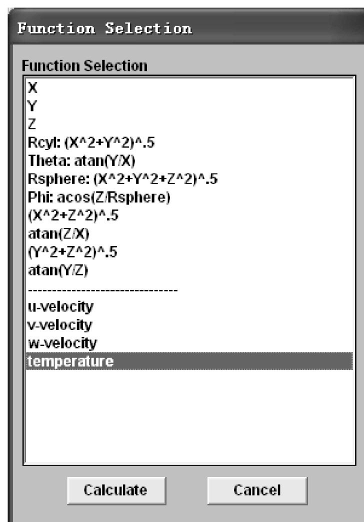


图 6-26　选择温度作为显示变量

视图区中散热器表面温度如图 6-27 所示。

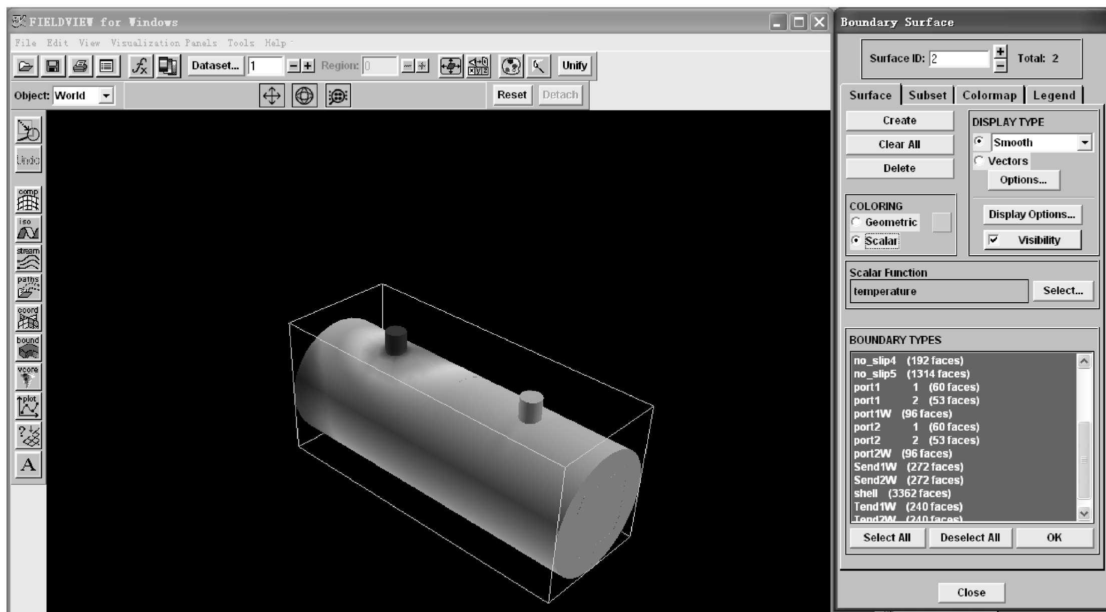


图 6-27　散热器表面温度

点击菜单[Edit]>[Copy]>[Image]，可复制以上视图。后面的操作对应的视图，均可按该命令进行复制操作。

点击“Boundary Surface”对话框中的“Clear All”按钮，可以清除散热器的表面温度显示。

4. 散热器内部温度显示

点击左侧工具栏按钮 coord，出现“Coordinate Surface”对话框。点击 tab 页“Surface”下的“Create”按钮，所有按钮生效，如图 6-28 所示。

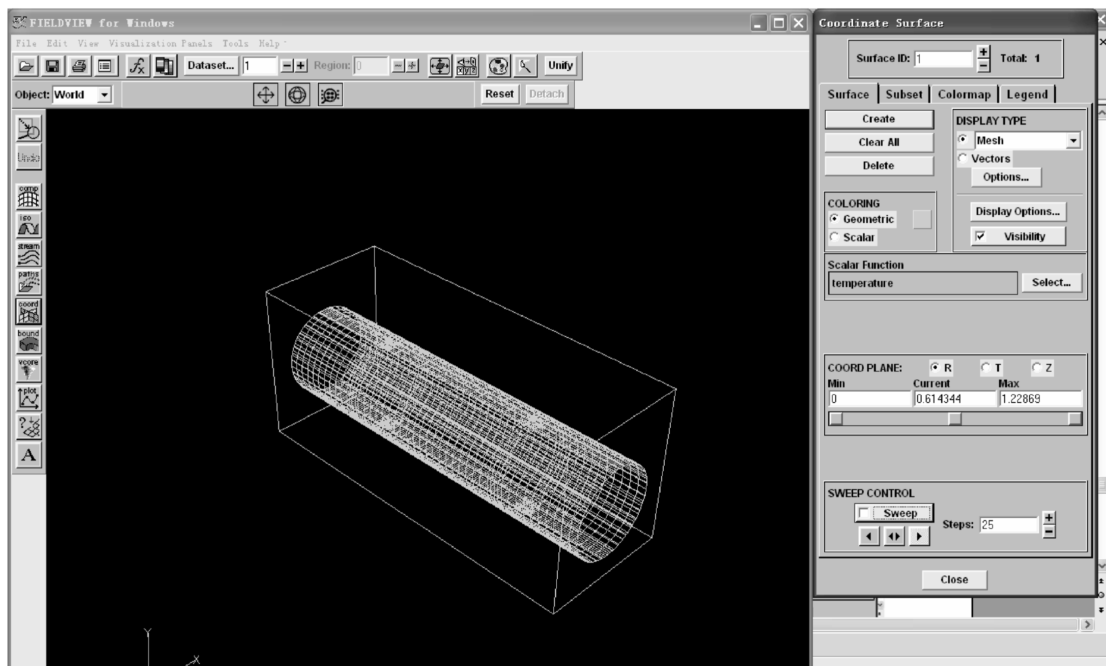


图 6-28　生成 Coordinate Surface

由于图 6-28 中“COORD PLANE”项默认选择“R”项，即“径向”的意思，图中所示的是半径为 0.614344m 的散热器内部圆周面，以网格形式显示。

将“COLORING”栏中的“Geometric”项更改为“Scalar”，切换到变量对应的模式。同时将“DISPLAY TYPE”栏中的“Mesh”项更改为“Smooth”，切换到光顺的云图模式。视图区中散热器的圆周面温度云图如图 6-29 所示。

如果将“DISPLAY TYPE”栏中的“Smooth”项更改为“Contours”，则切换到等值线模式。视图区中散热器圆周面的温度等值线如图 6-30 所示。

如图 6-31 所示，将“COORD PLANE”栏的“R”切换为“T”，可变为沿换热器中心线旋转的截面显示模式。通过滑块调节参数，可以选择不同角度对应截面上的温度云图。本例中的角度范围为 0°~360°。

如图 6-32 所示，将“COORD PLANE”栏的“T”切换为“Z”，可变为沿散热器中心线平移的法向截面温度云图。平移的范围为散热器 Z 向坐标的范围值。通过滑块调节 Z 向参数，可以选择 Z 向坐标对应截面上的温度云图。

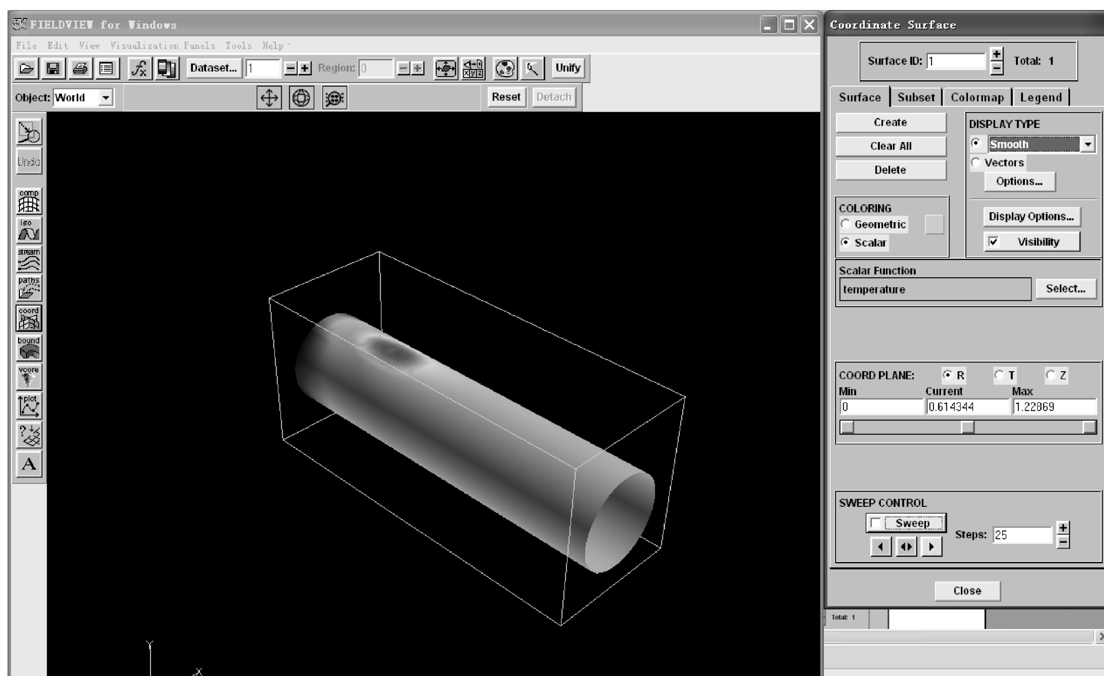


图 6-29　散热器圆周面温度云图

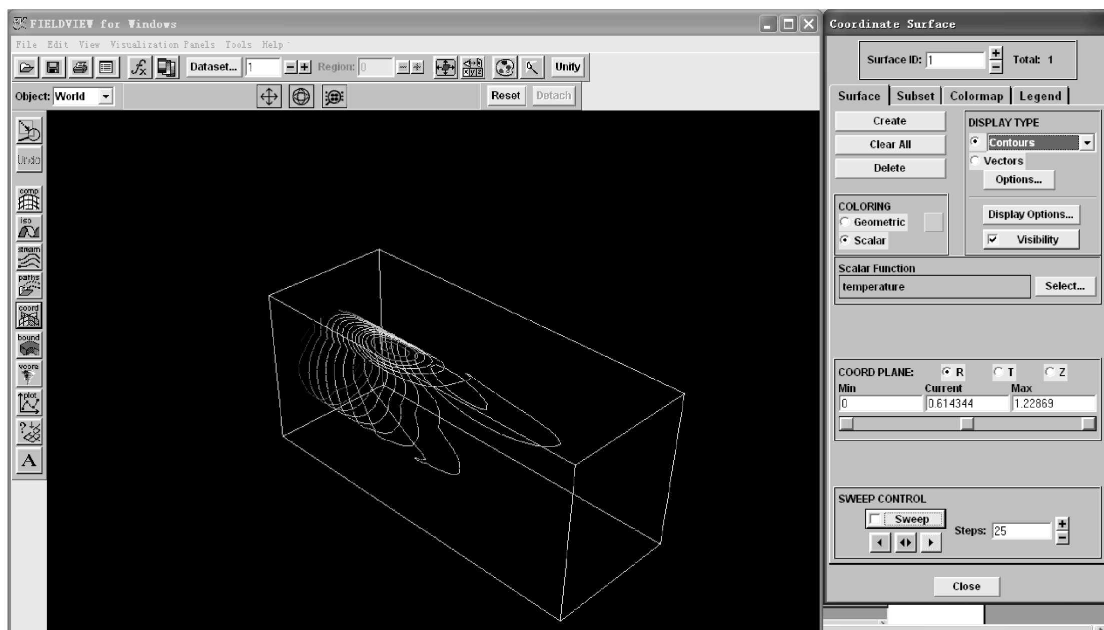


图 6-30　散热器圆周面的温度等值线

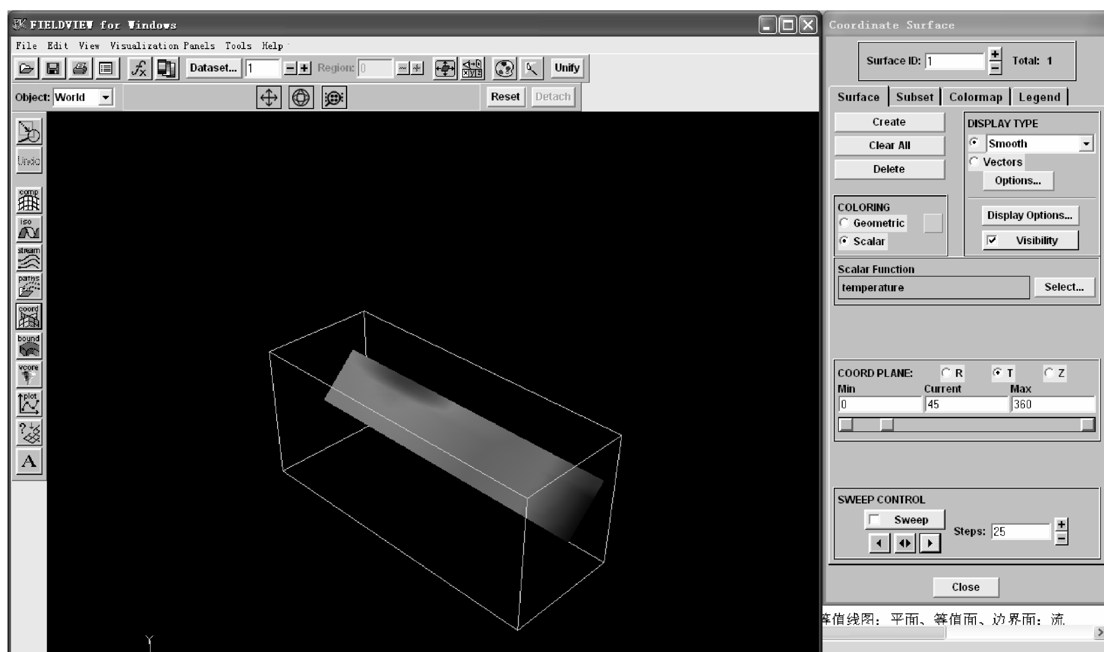


图 6-31　不同角度对应截面上的温度云图

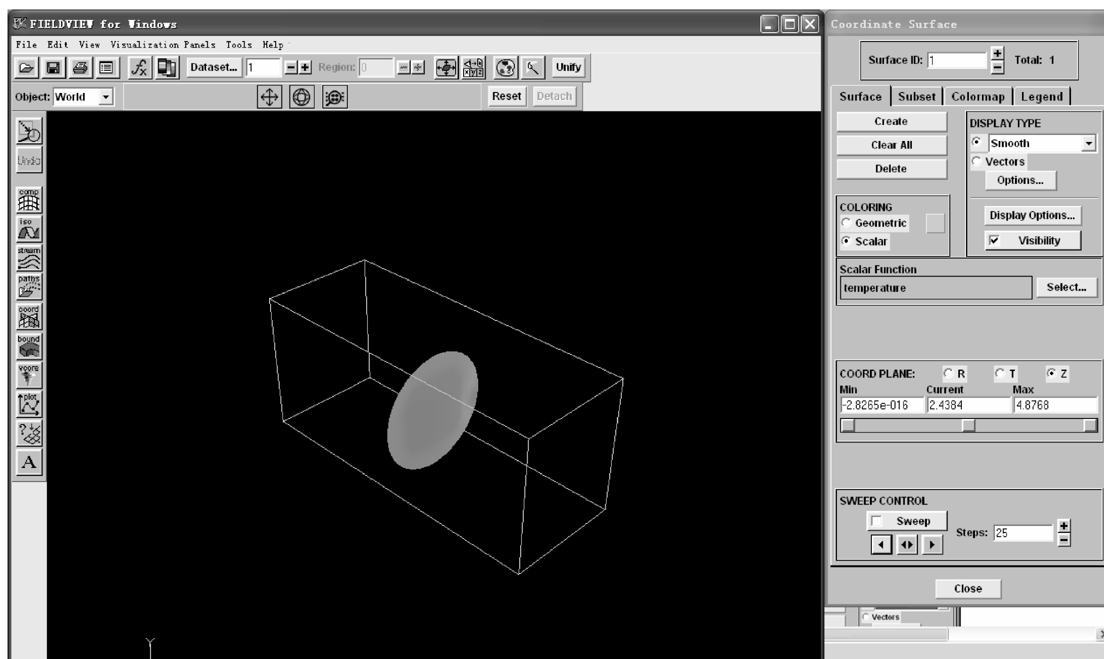


图 6-32　散热器中心线的法向截面温度云图

5. 散热器内部温度动画显示

选择菜单项[Tools] > [Flipbook Build Mode]。如图 6-33 所示，该项子菜单前自动加上一个勾号，表明 Flipbook 动画功能生效。同时，在“Coordinate Surface”对话框中，“SWEEP CONTROL”栏中的“Sweep”方式改为“Build”，如图 6-34 所示。

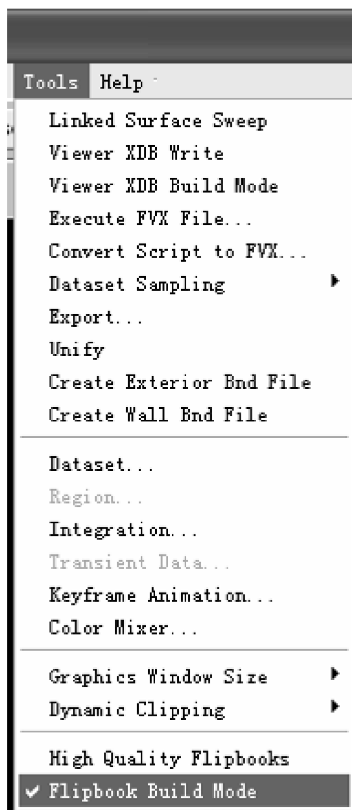


图 6-33　选择 Flipbook Build Mode 功能

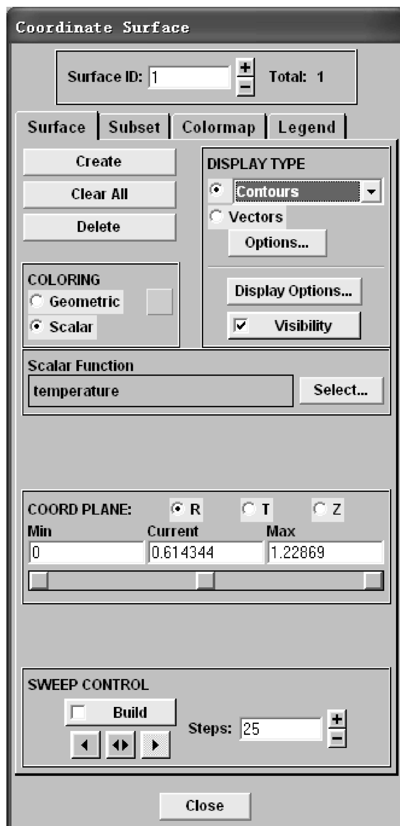


图 6-34　改变“SWEEP CONTROL”为“Build”

将“DISPLAY TYPE”栏换回为“smooth”方式，选择“SWEEP CONTROL”栏中的“Build”选项，视图区会出现散热器内部不同半径圆周面的温度云图的变化。由于“Steps”项设置为 25 步，软件会分 25 个半径的圆周面，即分 25 帧显示散热器内部的温度云图，故该过程会持续几秒钟的时间，如图 6-35 所示。变化完成后，出现如图 6-36 所示的“Flipbook Control”对话框。

点击按钮，可重复以上动画；点击按钮，可随时停止动画显示；点击和按钮，可分帧显示动画。点击 Save... 按钮，可将动画保存成“.avi”格式的动画文件，如图 6-37 所示。

点击菜单[File] > [Save Restart] > [Complete]，可完全保存以上操作，如图 6-38 所示。文件被保存为“.dat”格式，如图 6-39 所示。该格式的文件可以在重启软件后再次打开。

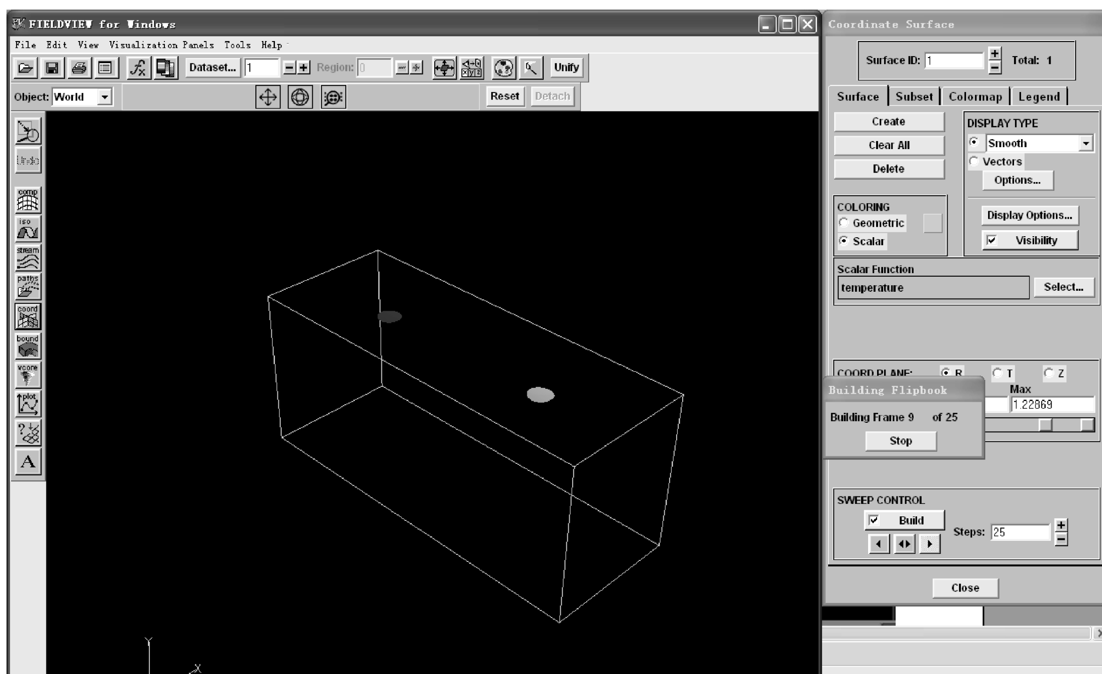


图 6-35 Flipbook 动画

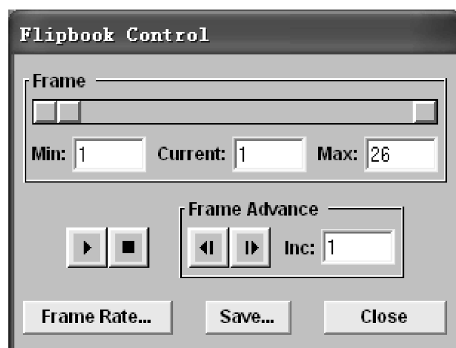


图 6-36 “Flipbook Control”对话框



图 6-37 保存动画文件



图 6-38 保存后处理文件

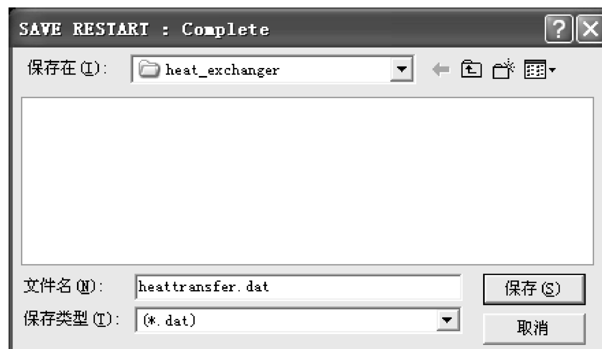
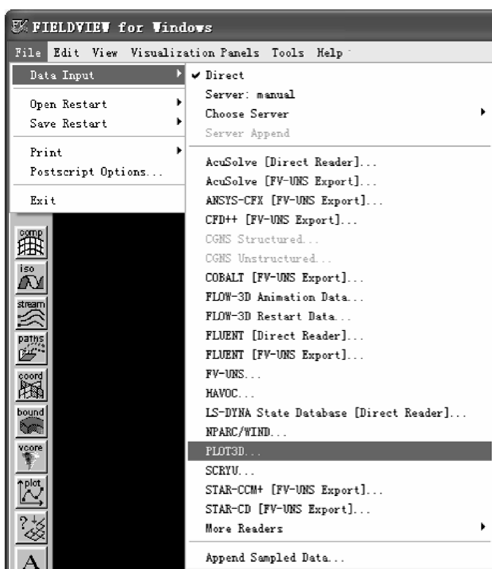


图 6-39 文件保存格式

6.4.2　F18 流场显示

1. 导入 F18 流场计算文件

如图 6-40 所示，选择 [File] > [Data Input] > [PLOT3D …]，打开文件。弹出“PLOT3D”对话框，如图 6-41 所示。



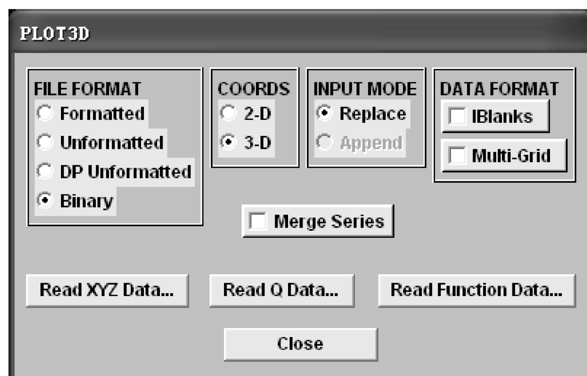
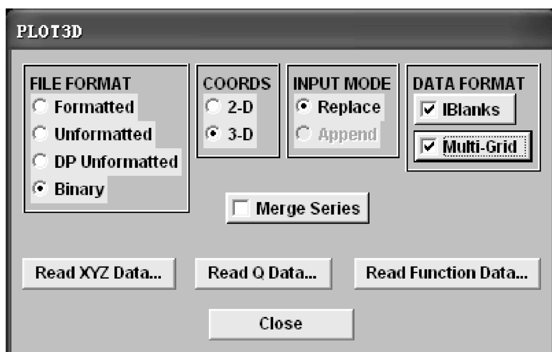


图 6-40　打开 F18 流场计算文件　　　　图 6-41　“PLOT3D”对话框

在弹出的“PLOT3 D”对话框中，将“DATA FORMAT”项下面的“IBlanks”和“Multi-Grid”两项选中，点击“Read XYZ Data...”按钮，如图 6-42 所示。

在“Read XYZ Data”对话框中，选择 F18 对称结构的“f18i9b _ g _ bin”文件，如图 6-43 所示。



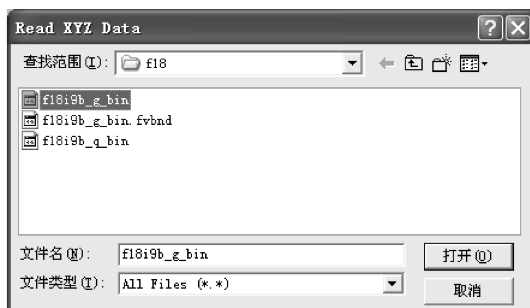


图 6-42　选中“IBlanks”和“Multi-Grid”两项　　　　图 6-43　导入“f18i9b _ g _ bin”文件

在弹出的“Grid Subset Selection”对话框中，保持默认设置，点击“OK”按钮，完成文件导入，如图 6-44 所示。

导入 F18 半机结构后的软件视图区如图 6-45 所示。

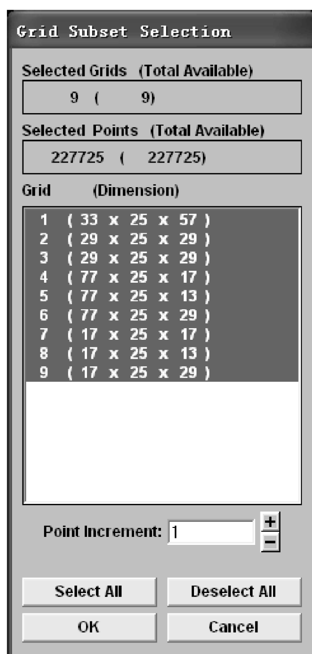


图 6-44　“Grid Subset Selection”对话框

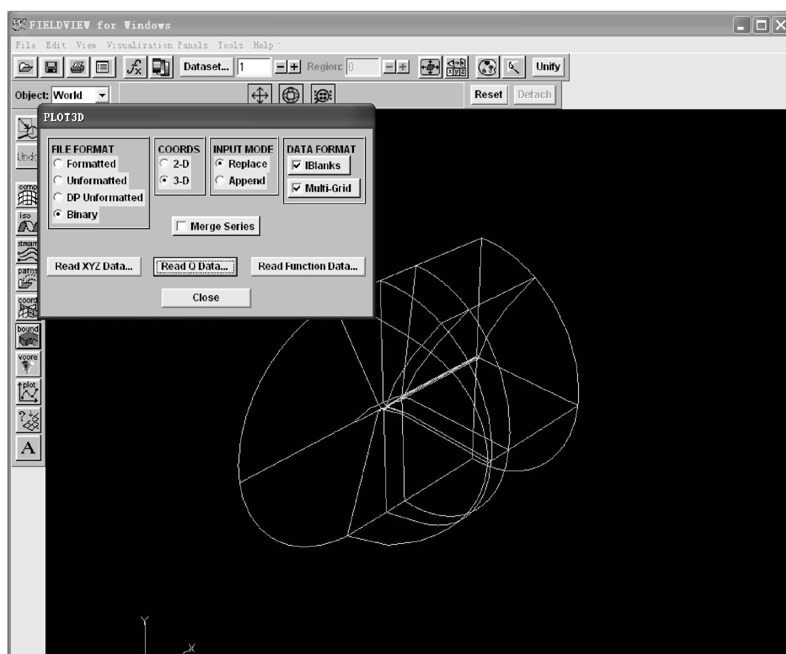


图 6-45　F18 半机结构

点击“PLOT3D”对话框中的按钮“Read Q Data...”，输入 F18 外流场计算结果文件“f18i9b_q_bin”，如图 6-46 所示。点击“Close”按钮，完成文件导入。

2. F18 整机显示

点击左侧工具栏按钮，出现如图 6-47 所示的“Boundary Surface”对话框。点击 tab 页“Surface”下的“Create”按钮，所有按钮生效；将“DISPLAY TYPE”栏中的“Mesh”

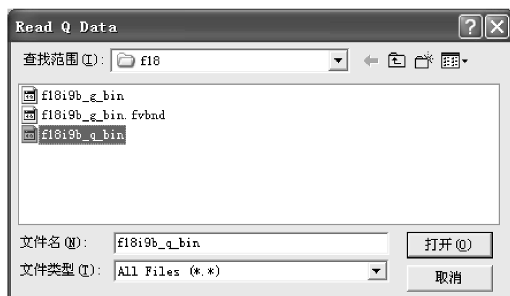


图 6-46　输入 F18 外流场计算结果文件

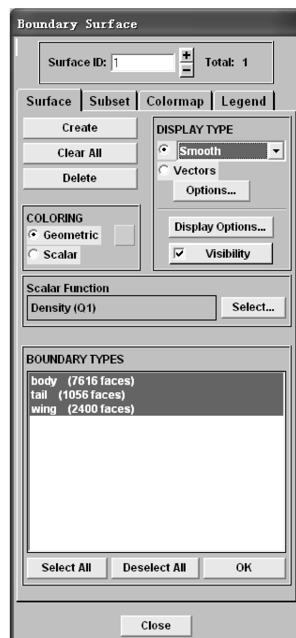


图 6-47　选择所有边界

项更换为“Smooth”项；点击“Select All”按钮，选择“BOUNDARY TYPES”栏中的所有边界，如图6-47所示。

点击“OK”按钮，视图区中的F18半机图如图6-48所示。

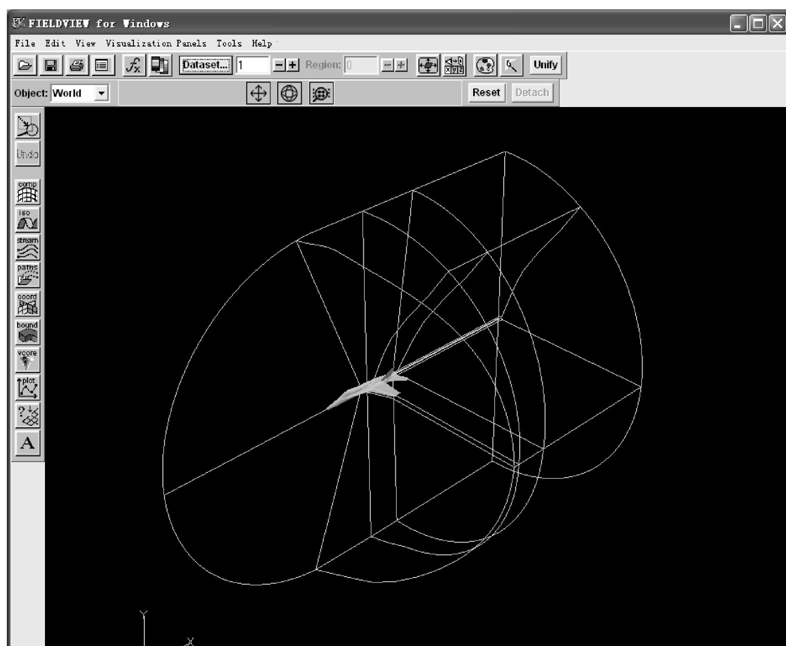


图6-48　F18半机图

取消选择[View]>[Perspective](透视视图方式)和[View]>[Outline](轮廓线方式)这两种视图方式，如图6-49所示。

视图区中的轮廓线条被取消显示，只剩下半机身，如图6-50所示。

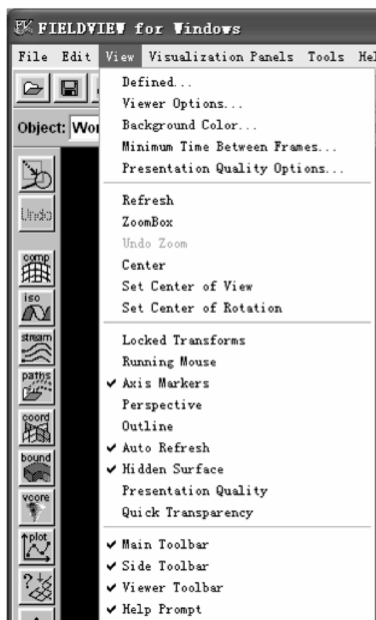


图6-49　取消选择视图区Perspective和Outline项

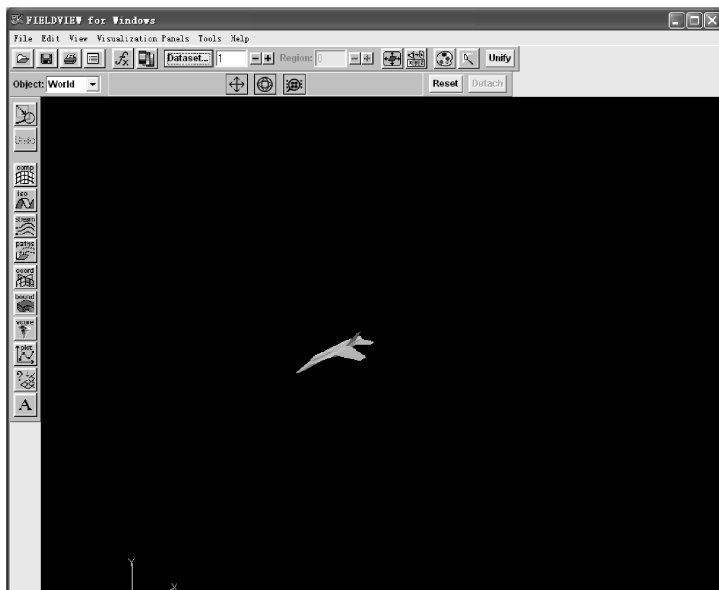


图6-50　取消显示轮廓线条

点击工具栏按钮 Dataset... ，出现如图 6-51 所示的“Dataset Controls”对话框。选择“DUPLICATION”栏中的“Mirror”项，弹出如图 6-52 所示的“Mirror Parameters”对话框。在“Mirror Parameters”对话框中，将选中的“X”项改为“Z”项，改变镜像方向。

点击“OK”按钮确认操作，视图区中的飞机整机图如图 6-53 所示。

3. F18 流场显示

点击左侧工具栏按钮 coord ，出现如图 6-54 所示的“Coordinate Surface”对话框。点击“Create”按钮，同时选择“COORD PLANE”栏中的“Z”项并将“Current”项的值设置为 0.001。点击“COLORING”栏中“Geometric”项右侧的按钮，出现如图 6-55 所示的“Geometry Color”对话框。在“Geometry Color”对话框中，选择灰色作为背景颜色。

选择“DISPLAY TYPE”栏中的“Vector”项，视图区变化为图 6-56 所示的矢量场形式。

选择“Coordinate Surface”对话框中的 tab 页“Subset”项，进行流场矢量图调整。如图 6-57 所示，保持“SUBSET”栏中“Increment”项为 1。

取消选择菜单项[View]>[Axis Markers]，视图区坐标轴取消，如图 6-58 所示。

通过调节滑块，调整“Subset”下“X CLIP”项和“Y CLIP”项的最小值 Min 和最大值 Max，确定视图区中 X 向和 Y 向坐标取值范围。坐标范围调整后的矢量场如图 6-59 所示。

如图 6-60 所示，点击菜单项[View]>[Defined...]，定义视图方式。在弹出的“Defined Views”对话框中，点击“VIEWING DIRECTION”栏中的“+Z”按钮，如图 6-61 所示。

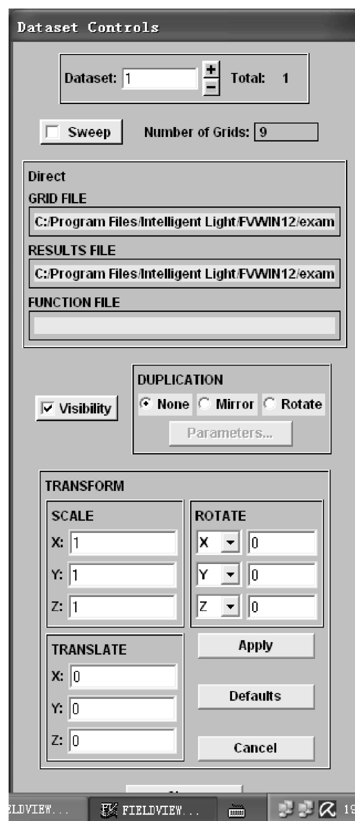


图 6-51 “Dataset Controls”对话框

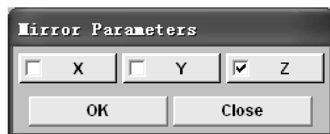


图 6-52 改变镜像方向

用鼠标右键放大显示飞机周围流场，放大后的矢量场如图 6-62 所示。

点击 tab 页“Surface”项中“Vector”项下的“Options...”按钮，弹出图 6-63 所示的“Vector Options”对话框。

在“Vector Options”对话框中，选择“Uniform Sampling”，视图区流场速度矢量图如图 6-64 所示。在右侧“Vector Options”对话框中的“Number of Samples”项中，X、Y、Z 三个方向上的矢量图标均为 10 个，调节这些值可以调节矢量图的疏密。

点击“Vector Options”对话框中的“Select...”按钮，弹出图 6-65 所示的“Function Selection”对话框。选择第一项“Velocity Vectors(PLOT3D)”，点击“Calculate”按钮进行矢量场绘制。

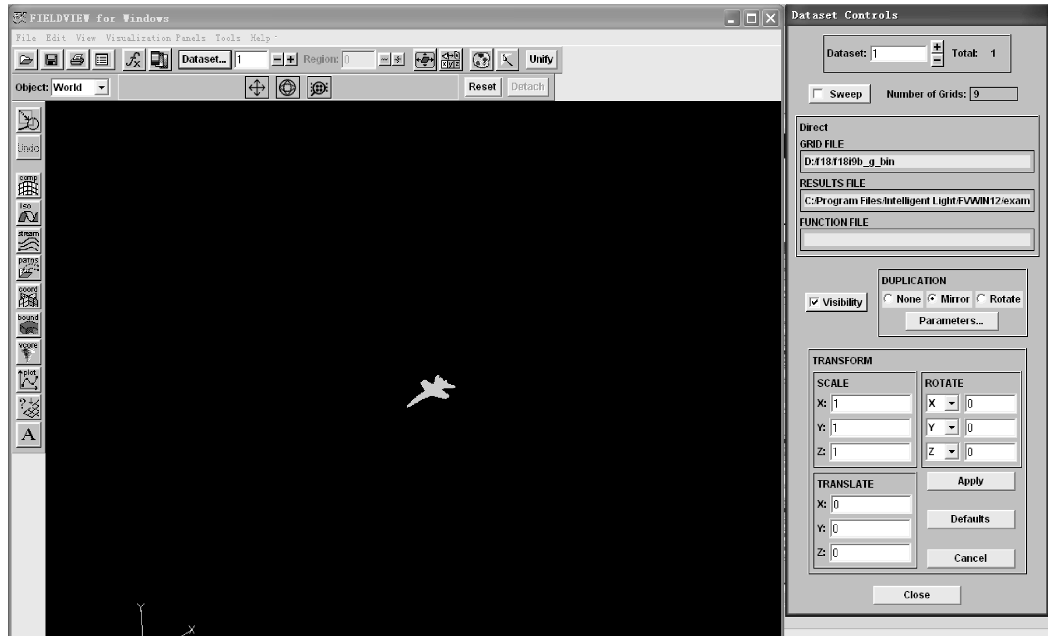


图 6-53　飞机整机图

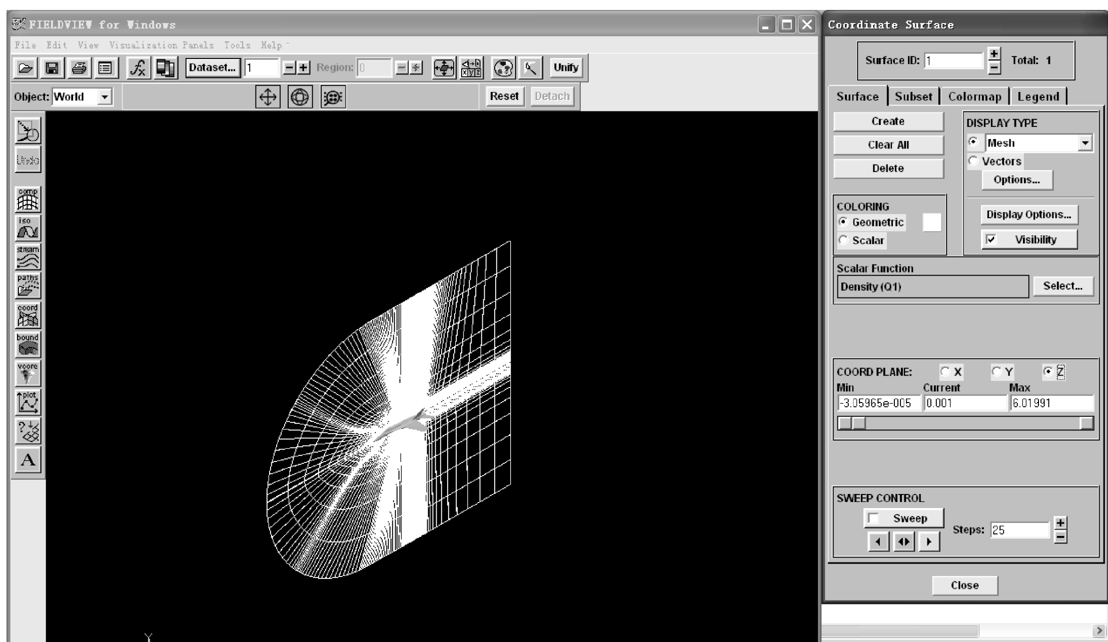


图 6-54　“Coordinate Surface”对话框

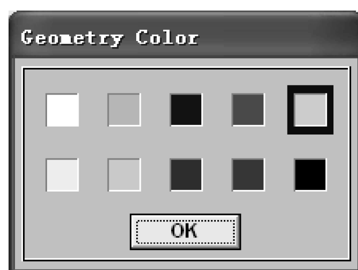


图 6-55　更换背景颜色

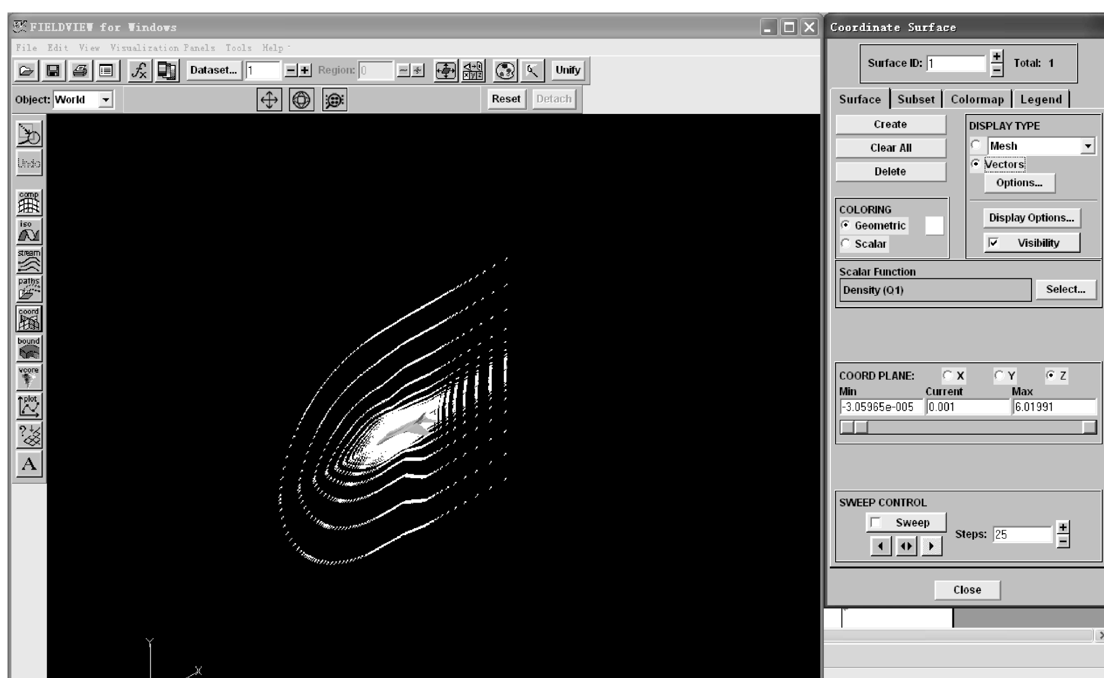


图 6-56　选择矢量场形式

将“Vector Options”对话框“VECTOR HEAD”栏中的“Type”项设置为“2D”，选择“Head Scaling”项并设置为 2，同时将“Length Scale”项设置为 4（可视电脑分辨率调节大小），点击“OK”按钮，调整后的视图区矢量场如图 6-66 所示。

点击 tab 页“Surface”项中“DISPLAY TYPE”栏中的“Display Options...”按钮，弹出图 6-67 所示的“Display Options”对话框。将“LINE TYPE”栏的“Thin”改为“Medium”，箭头加粗后的矢量场如图 6-68 所示。

点击菜单[File] > [Save Restart] > [Complete]，可完全保存以上操作。文件被保存为“f18. dat”，如图 6-69 所示。

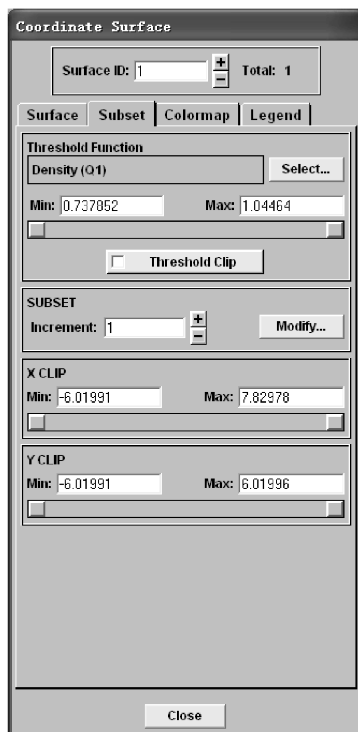


图 6-57　调整流场矢量图

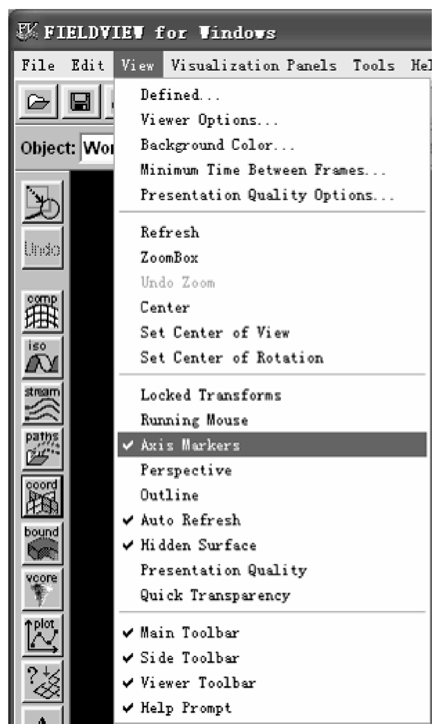


图 6-58　取消视图区坐标轴

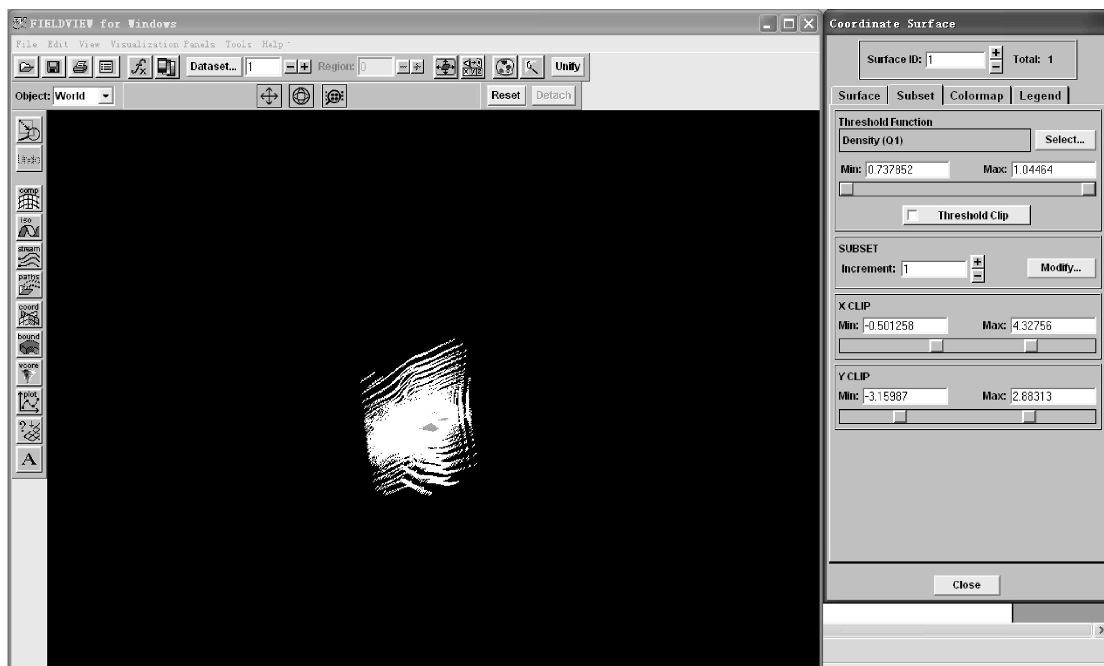


图 6-59　坐标范围调整后的矢量场

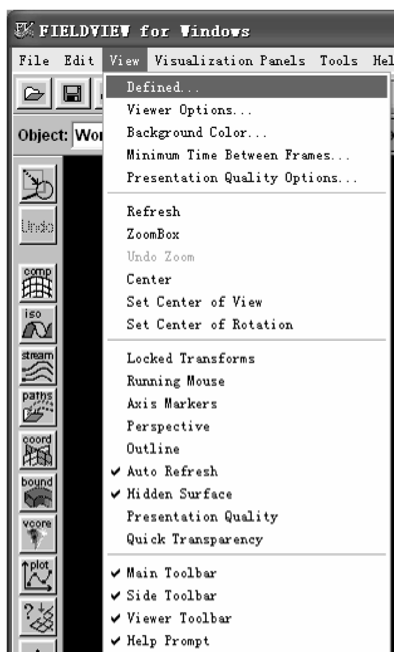


图 6-60 定义视图方式

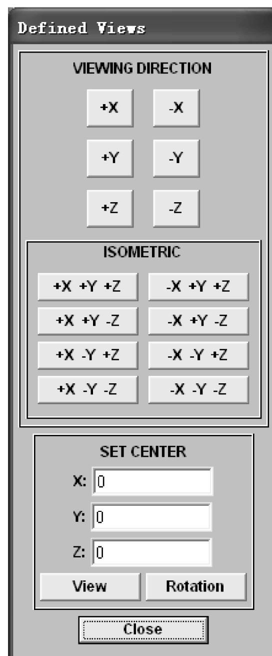


图 6-61 “Defined Views”对话框

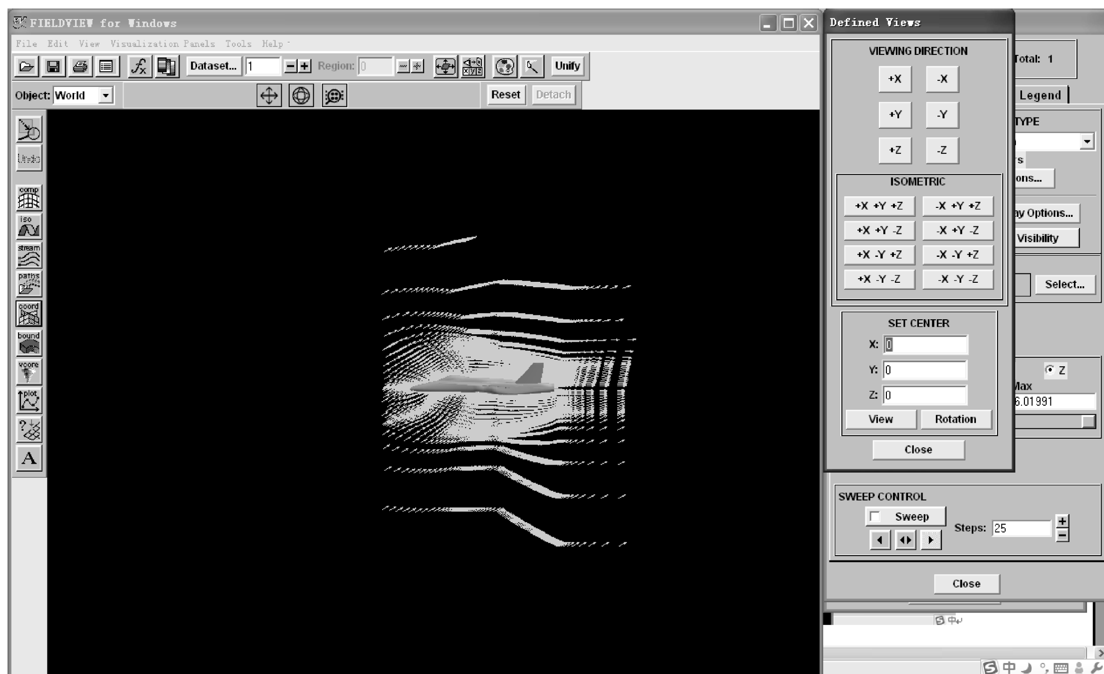


图 6-62 变换后的矢量场

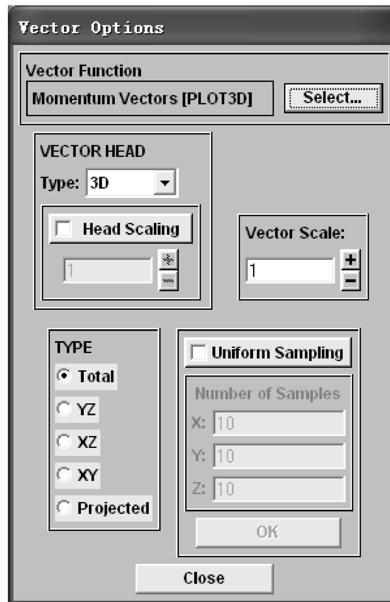


图 6-63　“Vector Options”对话框

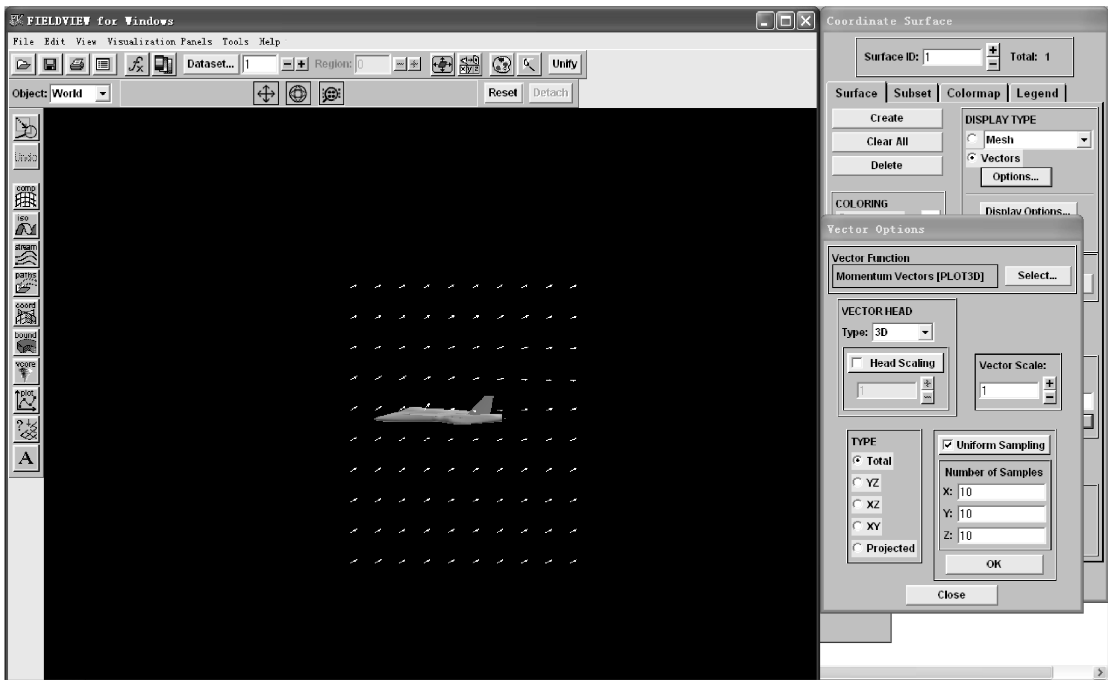


图 6-64　“Vector Options”对话框

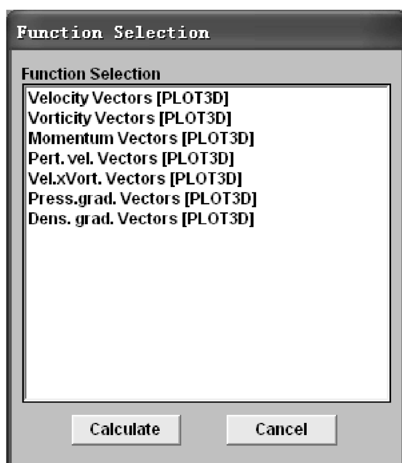


图 6-65 “Function Selection”对话框

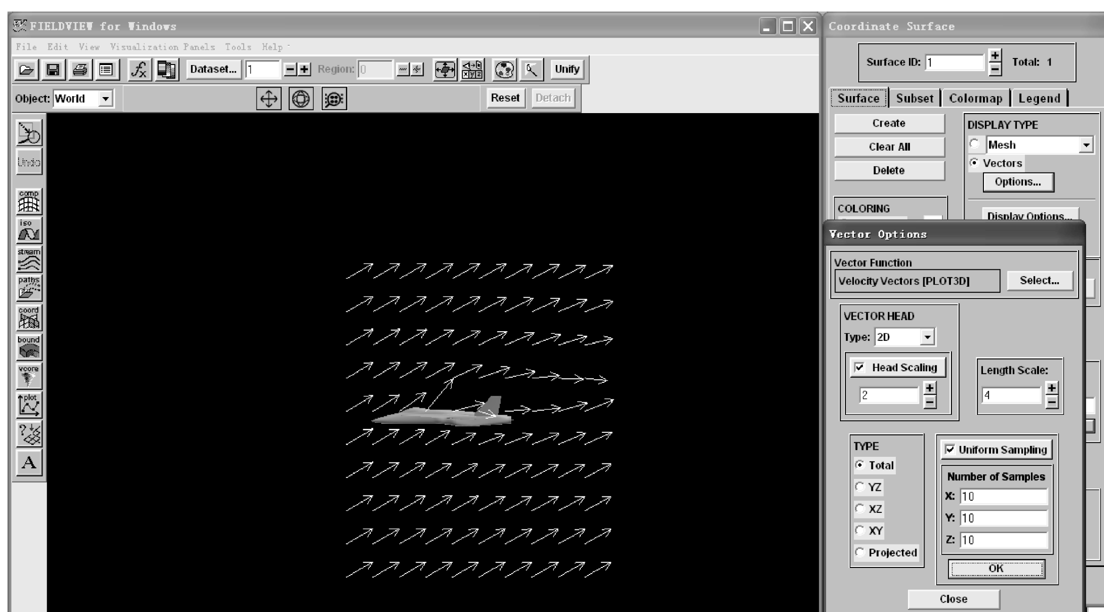


图 6-66 调整后的视图区矢量场

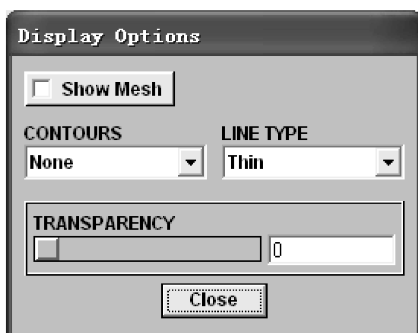


图 6-67 “Display Options”对话框

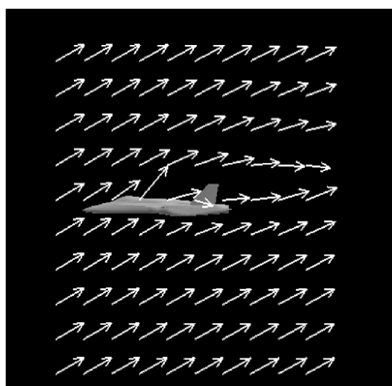


图 6-68 箭头加粗后的矢量场

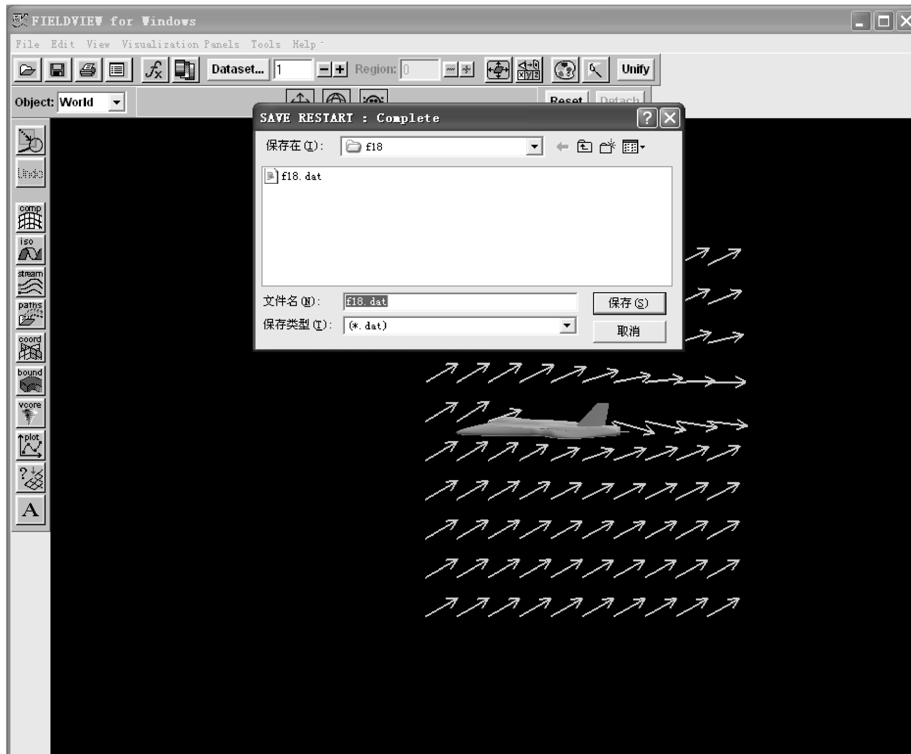
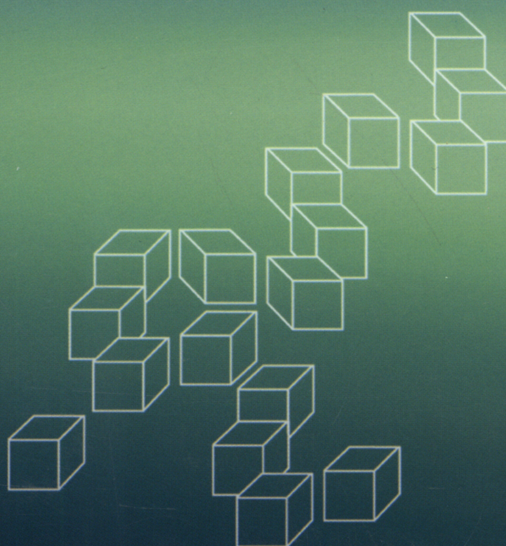

FIELDVIEW for Windows
File Edit View Visualization Panels Tools Help
Dataset...
Region:
Unify
Object: World
Reset
SAVE RESTART : Complete
保存在(I): f18
f18.dat
文件名(N): f18.dat
保存类型(T): (*.dat)
保存(S)
取消

图 6-69　保存文件

ISBN 978-7-111-35792-6
策划编辑：连景岩
封面设计：路恩中



上架指导：工业技术／机械设计／工程软件



地址：北京市百万庄大街22号
电话服务
社服务中心：(010)88361066
销售一部：(010)68326294
销售二部：(010)88379649
读者购书热线：(010)88379203
邮政编码：100037
网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版

定价：49.80元